This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

A. Gramberg

Technische Messungen

bei Maschinenuntersuchungen

und im Betriebe

Library
of the
University of Wisconsin

Maschinentechnisches Versuchswesen, Band I

Technische Messungen

bei Maschinenuntersuchungen und im Betriebe

Zum Gebrauch in Maschinenlaboratorien und in der Praxis

Von

Professor Dr.-Ing. **A. Gramberg**

Danzig-Langfuhr

Dritte, vielfach erweiterte und umgearbeitete Auflage

Mit 295 Figuren im Text

Berlin

Verlag von Julius Springer

1914

Alle Rechte,
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen,
vorbehalten.
Copyright 1914 by Julius Springer in Berlin.

6792553

197405
AUG 19 1915
T B D
676
3

Vorwort.

Die dritte Auflage der Technischen Messungen ist abermals umfangreicher geworden als die vorhergehende. Es war das nicht zu vermeiden, wenn die vielen Neuerungen in dem lebhaft sich entwickelnden technischen Meßwesen einigermaßen berücksichtigt werden sollten. Mein Hauptbestreben war, das Buch nicht zu einer reinen Aufzählung von Konstruktionen und zu einer Zusammenstellung von Katalognotizen werden zu lassen, auch wenn ich mehr als früher auf Einzelheiten der Bauarten eingehe und eine gewisse Vollständigkeit in der Anführung der Instrumente und Methoden erstrebt habe.

Neu bearbeitet ist das Kapitel über Mengenmessung. In den andern Kapiteln sind durchweg Ergänzungen vorgenommen, insbesondere sind neu aufgenommen oder ganz erneuert die Notizen über folgende Gegenstände: Eichung des Mikromanometers, Staugeräte, Dynamometer und dynamometrische Meßmethoden, Bestimmung der Leistung aus dem Rückdruck, Methode des doppelten Auslaufversuches, besondere Bauarten des Indikators, Arbeitszähler, Messung der Luftfeuchtigkeit. In allen übrigen Paragraphen sind Berichtigungen und Ergänzungen vorgenommen. Das kommt z. B. darin zum Ausdruck, daß 90 neue, teils sehr detaillierte Figuren (z. B. Fig. 140, 154, 166, 202—208, 258—260) aufgenommen wurden, die ich fast durchweg selbst neu zeichnen ließ, um der nötigen Korrektheit, Übersichtlichkeit und Sauberkeit sicher zu sein.

Mehr äußerlich ist es, daß das Kapitel über Spannungsmessung denen über Geschwindigkeits- und Mengenmessung jetzt voransteht, weil bei diesen vielfach Spannungsmessungen nebenbei vorkommen, nicht aber umgekehrt. —

Von vornherein plante ich die Fortsetzung des Werkes. Während in vorliegendem Band die Einzelmessungen behandelt werden, meist ohne Bezugnahme darauf, an welcher Maschinenart die Messung vorzunehmen wäre, soll ein anschließendes Werk über „Maschinenuntersuchungen“ systematisch die Untersuchungen besprechen, die an Dampfmaschinen, Gasmaschinen, Kreiselpumpen u. a. m. vorgenommen werden, um bei der Abnahme die Innehaltung der Garantien zu prüfen, oder um vor der Abnahme und im Betriebe die Maschine in den bestmöglichen Zustand zu bringen. Außer den eigentlichen Versuchen werden auch die Kennzeichen größtmöglicher Wirtschaftlichkeit und die Umrechnungen zu besprechen sein, die bei Abweichungen des Betriebszustandes von dem in der Garantie vorausgesetzten unvermeid-

lich sind. Das Manuskript zu dieser Fortsetzung ist schon länger im wesentlichen fertig. Doch war es mir nicht mehr möglich, es noch vor dieser dritten Auflage zum Druck zu bringen. Ich hoffe, es nun unmittelbar im Anschluß hieran zum Abschluß bringen zu können. Auch jetzt, zehn Jahre nachdem ich das Werk über Maschinenuntersuchungen zu planen begann, sind im Literaturverzeichnis nur drei Werke englischer Sprache über den Gegenstand aufzuführen, weil kein gleich allgemeines in deutscher Sprache vorhanden ist. —

Die dritte Auflage erscheint in größerer Anzahl als ihre Vorgänger; möchte sie die gleiche nachsichtige Aufnahme finden wie jene.

Meinem Assistenten, Herrn Ingenieur G. Hempel, bin ich für Hilfeleistung bei der Korrektur, zahlreichen Firmen — die immer angegeben sind — für die Vorlagen zu den Figuren zu Dank verpflichtet. Folgende Figuren sind anderweitig entnommen: Fig. 146 aus Z. d. V. D. Ing. 1913, S. 195; Fig. 177 aus Z. d. V. D. Ing. 1913, S. 1228. Die Vorlagen zu Fig. 253—257 verdanke ich der Freundlichkeit des Herrn Dipl.-Ing. G. Fischer.

Danzig-Langfuhr, im September 1914.

Anton Gramberg.

Inhaltsverzeichnis.

I. Einheiten und Dimensionen.

Seite

1. Messen nach Einheiten 1
2. Dimensionen 2

Grundeinheiten; Dimension, Homogenität von Gleichungen, Berechnung des Maßstabes von Schaubildern.

3. Praktische Einheiten 3
4. Technische und physikalische Grundeinheiten 4

II. Eigenschaften der Instrumente.

5. Allgemeine Eigenschaften 4

Richtkraft, Energieumsatz, Fernmeldung, registrierende Instrumente.

6. Statisches Verhalten 6

Charakteristik, Eichung, Korrektion; Ungenauigkeit, Unempfindlichkeit; elastische Nachwirkungen.

7. Dynamisches Verhalten der Instrumente 8

Eigenschwingungszahl, Widerstände, aperiodische Instrumente. Einfache und doppelte Dämpfung.

8. Konstruktionsregeln 14
9. Messung periodisch schwankender Größen 16

Messung des Mittelwertes; Untersuchung der Schwankungen.

10. Gleichmäßigkeit der Skala 17

Absolute und relative Genauigkeit; gleichmäßige, verjüngte, erweiterte Skala; Meßmethoden; Skala mit unterdrücktem Nullpunkt, Nullpunktskontrolle.

11. Skalen- und Ausgleichinstrumente 18
12. Totalisierende Instrumente 18

Beziehungen zwischen Augenblicks- und Integralablesungen.

13. Ausführung von Eichungen, Darstellung der Ergebnisse 20

Charakteristik, Korrektion.

III. Beobachtung und Auswertung.

14. Ablesung 21

Parallaktische Fehler, Anklopfen; einfache Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit.

15. Übliche Fehler bei der Auswertung 23

Prozentrechnungen; Bilden von Mittelwerten; quadratischer Wurzelmittelwert; kubischer, logarithmischer usw. Mittelwert; von reziproken Werten.

16. Verallgemeinerung: Beharrungszustand der Maschinen 25
17. Genauigkeit der Zahlenangaben 26

Stellenzahl bei den Ablesungen und Rechnungen, Genauigkeit des Gesamtergebnisses; Genauigkeit von Korrektionen; Differenzmethoden, Unsicherheiten in den physikalischen Grundlagen.

18. Darstellung von Ergebnissen; Fehlermaßstab 30

Mittelwert, mittlerer Fehler, stark abweichende Werte, zufällige und systematische Beobachtungsfehler; graphische Darstellung, Schaubild; Änderung der dargestellten Größen, zwei Größen willkürlich verändert, Kurvenscharen; Beispiel: Betriebsverhältnisse eines Ventilators.

IV. Längenmessung.

Seite

19. Einheiten; Druck und Temperatur 37
Nenn- und Sollänge.
20. Längenmeßinstrumente 39
Maßstab, Schublehre, Nonius, End- und Strichmasse; Schraublehre, Schraubenmikrometer; Meßmaschine.

V. Flächenmessung.

21. Planimeter 41
Polarplanimeter; Theorie des Planimeters, Nullkreis, Pol im Innern der Figur, Folgerungen aus der Theorie; Genauigkeit des Planimeters, Scheibenplanimeter, Rollplanimeter, Stangenplanimeter, Integraphen.
22. Simpsonsche Regel 48

VI. Messung der Spannung.

23. Einheiten 49
Spezifischer Druck, Spannung, Einheit der Spannung, Flüssigkeits- oder Gassäule, englisches Maßsystem.
24. Absoluter Druck, Überdruck, Vakuum. 51
Überdruck, Unterdruck, absolute Spannung, Vakuumangabe, Beispiel, Prozentteilung der Vakuummeter, Temperaturteilung bei Kühlanlagen.
25. Federmanometer. 53
Röhrenfedermanometer, Plattenfedermanometer, Anbau mit Schleife und Hahn.
26. Flüssigkeitsmanometer 56
Quecksilbermanometer, Temperaturberichtigung, abgekürztes Barometer, Wassermanometer, Anwendung zweier Flüssigkeiten.
27. Messung kleiner Spannungen und kleiner Spannungsunterschiede . . 58
Zugmesser, Verwendung zweier Flüssigkeiten, Recknagelsches Mikromanometer, Eichung des Mikromanometers. Manometerflüssigkeiten.
28. Differenzialmanometer 64
29. Eichung von Manometern 65
Kolbenmanometer, Kolbenpressen, Kontrollmanometer.
30. Anbau der Manometer 67
Druckhöhe einer Wasserpumpe, Förderhöhe, Entnahme der Spannung bei fließendem Medium, innerer Druck, dynamischer Druck, Gesamtdruck, Ablesung von Dampfspannungen.
31. Dampfspannung und Temperatur; Barometerstand 69
Feststellung des Barometerstandes, Siedeapparat. Benutzung des Wetterberichtes in Zeitungen.

VII. Messung der Zeit und der Geschwindigkeit.

32. Stechuhr 71
Uhr, Uhrzeit, Zeitdauer, Stechuhr, Doppelstechuhr.
33. Einheiten der Geschwindigkeit 72
Fortschreitende Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit.
34. Übersicht der Meßmethoden; Beziehungen zwischen fortschreitender und Winkelgeschwindigkeit 73
35. Zählwerk 74
Umlaufzähler, Zählwerk, Sperrkegelschaltung, Ankerschaltung, Zehnerschaltung, größere Umlaufzahlen.
36. Tachometer 76
Fliehpendeltachometer, Wirbelstromtachometer, Flüssigkeitstachometer, Bifluidtachometer; Sonderzwecke, Fernablesung; Antrieb der Tachometer, Meßbereich.
37. Handinstrumente 81
Handzählwerk, Handtachometer.

Seite

38. Vergleich 82
Zählwerk und Tachometer.

39. Nicht gleichförmige Geschwindigkeiten 82
Ursachen der Ungleichförmigkeiten, Hornscher Tachograph, Weg- und Zeitmarken, fortschreitende Geschwindigkeit. Verschiedene Methoden zur Untersuchung der Ungleichförmigkeit.

40. Hydrometrischer Flügel 88
Flügelgleichung, Eichung.

41. Anemometer 91
Flügelradanemometer, Schalenkreuzanemometer, Anemotachometer, Eichung; Rundlaufapparat, Mitwind, Freilaufeichung, Zwanglaufeichung; statische Anemometer.

42. Staugeräte 95
Staudruck, statischer Druck, Gesamtdruck. Pitotrohr; Geräte von Prandtl und Brabbée. Vergleich mit umlaufenden Instrumenten.

VIII. Messung der Stoffmenge.

43. Einheiten; Gewicht, Volumen, spezifisches Gewicht 100
Gewicht, Raummaß, spezifisches Gewicht, Dichte, Relativgewicht, Einfluß der Temperatur.

44. Reduziertes und unreduziertes Volumen bei Gasen. Einfluß der Feuchtigkeit 102
Bedeutung des reduzierten Volumens als Gewichtsangabe, Beispiele, englisches Maßsystem, Einfluß der Feuchtigkeit.

45. Wann Gewicht, wann Volumen angeben 104
Beispiele: Arbeitsbedarf der Pumpe, des Ventilators, Luftlieferung des Gebläses.

46. Spezifisches Gewicht von Flüssigkeiten 106
Aräometer, Gewichtsverlust eines Senkkörpers.

47. Spezifisches Gewicht von Gasen 108
Schilling-Bunsenscher Ausflußapparat, Gaswage, Gassäulenwagen, Unterschied oder Verhältnis der spezifischen Gewichte. Umrechnung der Ablesung auf normale Verhältnisse.

48. Meßmethoden zur Mengenermittlung 113
Messung einer abgeschlossenen Menge, Messung dauernd strömender Flüssigkeits-, Gas- oder Dampfmengen.

49. Mengenermittlung nach der Mischungsregel 114
Beispiele: Luftverbrauch der Gasmaschine, freiwilliger Luftwechsel eines Raumes, große Wassermengen in Turbinenanlagen, chemische Messung.

a) Versuchsanordnungen zur Mengenbestimmung.

50. Wägen 116
Auftrieb der Luft, Brückenwage, Entlastung, Form einer zu beschaffenden Wage: Laufgewichtswage oder Gewichtswage, Hilfslaufgewicht, Eichung und Eichungsvorschriften.

51. Messen und Wägen von Flüssigkeiten 121
Tara, Brutto- und Nettogewicht, Einfüllen in geeichte Gefäße, Einfluß der Temperatur, Eichung z. B. durch Zusatz von Chemikalien.

52. Dauermessungen 122
Abreißspitze.

53. Volumetrische Ermittlung von Gasmengen 124
Meßglocke, Auffüllmethode, Ausblasmethode, Beispiel: Luftlieferung und Lieferungsgrad eines Kompressors.

54. Ermittlungen von Dampfmengen durch Kondensatmessungen 128

55. Mengenermittlung aus dem Indikatordiagramm 129
Beispiele: Volumetrischer Wirkungsgrad eines Kompressors, Dampfverbrauch einer Dampfmaschine.

56. Mengenermittlung aus der mittleren Geschwindigkeit 130
Wassermenge in Flußläufen und Turbinenkanälen, Luftmengen bei Lüftungs- oder Kühlanlagen, Integrierung der Menge in kreisrunden Rohrleitungen.

Seite

57. Wassermessung mittels Schirm 134
58. Wehrmessungen 135

Theorie, Ausflußziffer k, Überfälle ohne und mit Seitenkontraktion, sowie bei sehr weitem Zulaufgraben; das Wehr, Messung der Standhöhe, Wehrbreite.

59. Ausflußöffnungen an Gefäßen 140

Geschwindigkeitshöhe, Druckhöhe, Ausflußziffer k, Mündung, Düse, Kontraktionsziffer μ, Eichung der Öffnung, schwankende Ausflußmengen: Brauersches Verfahren, Verwendung von Mündung oder Düse.

60. Ausfluß an Rohrleitungen 146

Öffnungsverhältnis, Vorgeschwindigkeit, Art der Druckentnahme, Ausfluß von Luft.

61. Durchflußöffnungen an Rohrleitungen 152

Scharfkantige Mündungen in glatter Rohrleitung, Ausflußziffer, Berichtigungsziffer, Bedingungen für die Versuche, Versuche der Kommission für die Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren; Düse oder Mündung, Normaldüse, Empfindlichkeit für Störungen.

62. Einströmung in eine Leitung 159
63. Venturirohr 160

Anzeige des augenblicklichen Wasserdurchgangs; Partialwassermesser. Messung von Luft- und Gasmengen, Hochdruckdampf und Preßluft.

b) Zähler für dauernde Mengenmessung.

64. Übersicht 163

Gewicht oder Volumen, Verwendungsgebiet der Zähler; Bauarten; Motorzähler, Kippmesser, Strömungsmesser; Energie- und Druckverlust; Verhalten bei kleinen Durchflußmengen, Empfindlichkeit, Unabhängigkeit vom spezifischen Gewicht; Kesselspeisewassermesser; Eichung.

65. Kolbenmesser 167

Kolbenwassermesser: Schmidt, Eckardt; Druckluftmesser.

66. Geschwindigkeitsmesser 168

Flügelradwassermesser, rückmessende Flügelradwassermesser, Einstrahlmesser; Nennleistung; Trocken- und Naßläufer, Wassermesserverbindungen, Woltmann-Wassermesser.

67. Kapselmesser 172

Zwangläufige Förderung; Scheibenwassermesser; Verwendung für Druckluft.

68. Gasmesser 176

Nasse und trockene Gasmesser; Druckverlust; Croßley-Trommel, Experimentier- oder Stationsmesser; Beobachtung von Druck und Temperatur; Kingscher Überlauf; Eichung, Kubizierapparate.

69. Kippmesser 180

Offene Wassermesser, Messer für körniges Fördergut.

70. Kontinuierliche oder automatische Wägung 185

Automatische Wage von Schenck.

71. Strömungsmesser für große Mengen 187

Integrierung der Menge nach der Zeit: mechanisch betätigter Hebel, Partialwassermesser, Planimetrierrad, Anwendung der Mischungsregel; Thomasmesser für Gas.

72. Dampfmesser 190

Schwimmerdampfmesser, Mündungsdampfmesser, Düsendampfmesser; Dampfzeiger, Gehrescher Mündungsdampfmesser; Einbau des Dampfmessers.

IX. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

73. Übersicht 199

Kraft, Arbeit, Leistung im Gleichgewicht und Beharrungszustand; Beschleunigungs- oder Verzögerungszustände; drehende Bewegung, Drehmoment im Gleichgewichtszustand, Beharrungszustand, Beschleunigungs- und Verzögerungszustand.

74. Einheiten 202

Deutsches und englisches Maßsystem.

75. Dynamometer für Kraftmessung 204

Federwage, hydraulisches Dynamometer, Meßdose, Zugkraftmesser zur Untersuchung landwirtschaftlicher Maschinen.

Seite

76. Bremsdynamometer 208

Doppelte Aufgabe: Erzeugung und Messung des Drehmomentes; Pronyscher Zaum, Elastizität, statische Verhältnisse; Bandbremse, zuverlässige Hubbegrenzung, Abmessungen einer Bremse, Ausführung der Bremsung; selbstregelnde Bremsen, Ausgleichung des Eigengewichts; Seilbremse, Wirbelstrombremse, Hysteresisbremse; Zusammenarbeiten der Bremse mit der abgebremsten Kraftmaschine.

77. Transmissionsdynamometer und entsprechende dynamometrische Meßmethoden 222

Transmissionsdynamometer, dynamometrische Meßmethoden, Getriebedynamometer; Zahndruckdynamometer, Zahndruckdynamometer von Amsler-Laffon, Eigenreibung; Riemendynamometer; Wiegedynamometer, Fischinger-Dynamometer; hydraulische Dynamometer; Benutzung einer Welle oder Kupplung als Meßfeder; Föttinger-Dynamometer, Bedeutung der Transmissionsdynamometer.

78. Bestimmung der Leistung aus dem Rückdruck 233

Gestell der Dynamomaschine pendelnd, Gestell der zu untersuchenden Maschine pendelnd, Pendeldynamo, Pendelmotor.

79. Elektrische Leistungsmessung 236

80. Vernichtung der elektrischen Energie 237

81. Ermittlung von Kraft und Drehmoment aus Beschleunigungsverhältnissen, insbesondere zur Bestimmung von Eigenverlusten 240

Fortschreitende und umlaufende Bewegung; Ermittlung von Trägheitsmomenten; Spiegelderivator zur Ermittlung von Differentialquotienten, Spiegellineal; Beispiel: Ermittlung der Eigenverluste einer Wirbelstrombremse; Bilden von Differenzen; Methode des doppelten Auslaufversuchs.

X. Der Indikator.

82. Kolbenwegdiagramme. Indizierte und effektive Leistung 250

Indikatordiagramm, indizierte Leistung, effektive Leistung, Bremsleistung, Antriebleistung.

83. Bauarten des Indikators 251

Warm- und Kaltfederinstrumente; Schreibzeug, Rollen- und Hebelhubminderer, Indikatorhahn, Atmosphärenlinie, auswechselbare Rolle, Federmaßstab; Schreibzeug, auswechselbarer Einsatz, kleinere Kolben, größere als normale Kolben, Schreibgestänge, Proportionalität; Trommel, Anhaltevorrichtung; Diagrammpapier; Ausführung in mehreren Größen.

84. Handhabung des Indikators 263

Aufnahme eines Diagramms.

85. Auswertung des Diagramms 266

Mittlerer indizierter Druck, indizierte Leistung, Beispiel: Dreifachexpansionsmaschine; Maschinenhub; Verbrennungsmaschinen, Diagrammbündel und Schwachfederdiagramm bei Gasmaschinen; Stufenkolbenpumpe, Zweitakt-Verbrennungsmaschinen, Einblasepumpen der Dieselmaschinen, Kondensations- und Speisepumpen von Dampfkraftanlagen, Hilfszylinder.

86. Auswertung von Dauerversuchen 270

Beispiel eines Dampfverbrauchsversuches, spezifischer Dampfverbrauch.

87. Federmaßstab, Eichung 273

Spannungseichung, Gewichtseichung, Vergleich beider Methoden; Bestimmungen über die Feststellung der Maßstäbe von Indikatorfedern, Gleichmäßigkeit der Feder, mittlerer Federmaßstab, wahrer Federmaßstab, Berücksichtigung der Ungleichmäßigkeiten.

88. Versetzte Diagramme; Zeit- und Kurbelwegdiagramme 279

Versetzte Diagramme; Zeitdiagramm, Kurbelwegdiagramm; Indikator mit umlaufender Trommel, Markenschreibzeug, Markenschreibzeug mit schwingender Feder, Nacheilung des Markenschreibzeugs; Zeitdiagramm einer Gasmaschine, Umzeichnung in Kolbenwegdiagramme, Vergleich eines Zeit- mit einem Kolbenwegdiagramm.

89. Maßstab der Diagramme 288

90. Fehler der Schreibstiftbewegung 289

Federschwingungen, Indizieren flüssiger Medien, Ursachen außer den Massenschwingungen.

91. Störung des Maschinenganges durch den Indikator 294

Seite

92. Fehler der Trommelbewegung 294
Schnurdehnung.
93. Zeichnerische Eliminierung der Massenschwingungen 296
Reibung und Dämpfung; Beispiel: Berichtigung eines Diagrammes einer Gasmaschine, Ermittlung der Maßstäbe.
94. Besondere Anwendungen des Indikators 303
Kraftmesser, Ventilerhebungsdiagramme.
95. Besondere Bauarten des Indikators 304
Kältekompressoren, fortlaufende Diagrammaufnahme; Indikatoren für hohe Umlaufzahlen, optische Indikatoren, Mikroindikator.
96. Arbeitszähler 310
Theorie, Verwendungsgebiet, Arbeitszähler mit dem Indikator verbunden.

XI. Messung der Temperatur.

97. Einheit 316
Grad, absolute Temperaturskala, Wasserstoffskala.
98. Ausdehnungsthermometer 317
Quecksilberthermometer, Stickstoffthermometer, Weingeistthermometer für niedrige Temperaturen; Fadenkorrektion, Skalenkorrektion; Stabthermometer; Dauer der Einstellung, Einflüsse der Strahlung, Einfluß der Ableitung.
99. Elektrische Temperaturmessung 321
Widerstandsthermometer, thermoelektrische Meßmethoden, Pyrometer von Le Chatelier; feinere Temperaturmessungen, Einfluß der Ableitung und Strahlung.
100. Betriebsinstrumente 325
Graphitpyrometer, Metallthermometer, Thalpotasimeter, Quecksilberdruckthermometer, Segersche Kegel.
101. Strahlungspyrometer 327
Optische Pyrometer.
102. Eichung und Anbringung der Thermometer 328
Thermometer in Stutzen; Ableitung. Messungen in Räumen mit Saugspannung, am Fuchs von Feuerungen.

XII. Messung der Wärmemenge.

103. Ermittlung der Wärmemenge aus der Temperaturerhöhung 330
Wärmeinhalt, mittlere spezifische Wärme, wahre spezifische Wärme.
104. Wärmeeinheit. Spezifische Wärme des Wassers 331
Kalorie, Nullpunktskalorie, mittlere Kalorie.
105. Ausführung der Messung 333
Wärmeaustausch mit der Umgebung; Beispiel: Abkühlungsversuch, Wasserwert, Versuch im Beharrungszustand.
106. Wärmemengen in Luft. Luftfeuchtigkeit 335
Relativer und absoluter Feuchtigkeitsgehalt; Haarhygrometer, Psychrometer, Schleuderpsychrometer, Aspirations-Psychrometer; Beispiel: Kühlleistung des Luftkühlers einer Kühlanlage, Fehlerquellen, Einstrahlungsversuch.
107. Ermittlung der Wärmemenge aus Dampfmengen 341
Flüssigkeitswärme, Verdampfungswärme, Überhitzungswärme, Wärmeinhalt des Dampfes; Beispiel: Dampfkessel, Wärmeabgabe von Heizkörpern, Kälteleistung einer Kühlmaschine.
108. Ermittlung der Dampffeuchtigkeit 343
Drosselkalorimeter, Abscheidekalorimeter, andere Methoden; Probenahme.

XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.

109. Einheiten 346
110. Oberer und unterer Heizwert 347
Oberer (Verbrennungswärme) und unterer Heizwert; Bedeutung beider für unmittelbare Arbeitserzeugung, für Ausnutzung zu Heizzwecken.

Seite

111. Feste Brennstoffe 350

Bombenkalorimeter, Aspirator, Handhabung der Bombe; Auswertung: Wasserwert, Eisendraht, graphische Strahlungsberichtigung; Beispiel: Entnahme und Behandlung der Probe, nasse Kohle. Verbrennung in einem Sauerstoffstrome von Atmosphärenspannung, Parr-Kalorimeter.

112. Zusammensetzung der Kohle 358

Grobe Feuchtigkeit, trockene Substanz, hygroskopisches Wasser, flüchtige Substanz, Aschengehalt, Kohlenstoffgehalt, Wasserstoffgehalt.

113. Gasförmige Brennstoffe 359

Junkersscher Kalorimeter; Beispiel; Genauigkeit des Junkersschen Kalorimeters, Fehlerquellen; Sonderausrüstungen, Kraftgas, Druckregler.

114. Flüssige Brennstoffe; Verbandsformel 363

Verbrennung im Junkers-Kalorimeter, in der Bombe.

XIV. Gasanalyse.

115. Allgemeines 365

Aufgabe, Zweck, Verfahren.

116. Luftüberschußziffer 366

Genaue Formel.

117. Rauchgasanalyse 367

Orsat-Apparat: Handhabung, Absorptionslösungen, Einzelheiten der Konstruktion, Fehler beim Analysieren, Probeentnahme, Stelle der Probenahme. — Buntesche Bürette; Kohlensäuremesser von Cramer.

118. Was mißt die Analyse? Kontrolle des Ergebnisses 375

Raumprozente des trocken gedachten Gases; Einfluß des Wasserstoffgehaltes im Brennstoff. Raumverhältnisse bei einer Verbrennung mit und ohne Luftüberschuß. Abhängigkeit der Bestandteile voneinander. Näherungsformeln für die Luftüberschußziffer.

119. Essenverluste 379

Rauchgasmenge, spezifische Wärme. Essenverluste ohne und mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes.

120. Selbsttätige Apparate 383

Ados-Apparat, Krellscher Rauchgasanalysator. Nacheilung. Entnahmestelle.

121. Analyse anderer Gase; Bestimmung von Kohlenwasserstoffen 387

Kraftgase. Methan, Wasserstoff, schwere Kohlenwasserstoffe. Erweiterter Orsat-Apparat. Beispiel: Leuchtgasanalyse.

122. Optische Analyse. Entnahme heißer Gase 390

Interferometer. Kaltwarmes Rohr.

Literaturverzeichnis 392

Namen- und Sachverzeichnis 403

I. Einheiten und Dimensionen.

1. Messen nach Einheiten. Jede Messung hat den Zweck, die zu messende Größe unter Benutzung irgendeiner *Einheit* zahlenmäßig festzulegen, mit anderen Worten, festzustellen, wie oft die betreffende Einheit in der gemessenen Größe enthalten ist. Haben wir die Länge eines Stabes zu 3,5 m festgestellt, so ist das Meter die Einheit, nach der wir messen — natürlich auch eine Länge. Die Zahl 3,5 gibt uns an, daß ein Meter dreimal vollständig in der gemessenen Länge enthalten ist, außerdem bleibt noch 0,5 m übrig.

Als Ergebnis der Messung erhalten wir hier wie meist eine benannte Zahl. Die Benennung ist die Einheit, mit der wir gemessen haben.

Nicht immer ist diese Benennung so einfach wie eben. Für Geschwindigkeiten z. B. geben wir das Meßergebnis in Metern pro Sekunde ab. Man stellt etwa fest, daß ein Eisenbahnzug den Weg von 250 m in der Zeit von 25 Sekunden durchläuft. Man hat beide Zahlen zu dividieren, um die Geschwindigkeit zu erhalten: sie ist $\frac{250\,\mathrm{m}}{25\,\mathrm{sek}} = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$.

Man nennt die Einheit: Meter pro Sekunde eine abgeleitete Einheit. Sie ist nämlich abgeleitet aus den beiden Grundeinheiten, dem Meter für die Länge und der Sekunde für die Zeit. Die Schreibweise $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$ für diese abgeleitete Einheit hat außer dem Vorzug der Kürze noch den weiteren, daß man aus ihr ersieht, man habe die Zahl der Meter durch die Zahl der Sekunden zu teilen, um die Geschwindigkeit zu erhalten.

Für Messung der Arbeit pflegt das Meterkilogramm als Einheit zu dienen. Hebt man das Gewicht von 3 kg um 5 m in die Höhe, so leistet man $5\,\mathrm{m} \cdot 3\,\mathrm{kg} = 15\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}$ Arbeit. Die Schreibweise m · kg gibt wieder an, wie die Arbeitseinheit aus den Grundeinheiten entstanden ist, nämlich durch Multiplizieren.

Wirkt ein Gewicht von 18 kg an einem Hebelarm von 4 m, so übt es ein Moment — Dreh-, Biegungsmoment oder dergleichen — aus von $4\,\mathrm{m} \cdot 18\,\mathrm{kg} = 72\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}$. Wir sehen also, daß zwei verschiedenartige Größen eine gleichlautende Benennung haben können. Trotz dieser formalen Übereinstimmung bleiben sie natürlich verschiedenartige

Größen. Im allgemeinen aber ist die Benennung für die Art der zu messenden Größe charakteristisch: eine Angabe mit der Benennung m · kg kann keine Geschwindigkeit sein.

2. Dimension. Wir haben eben neue Einheiten aus den Grundeinheiten: Meter für die Länge, Kilogramm für die Kraft (das Gewicht) und Sekunde für die Zeit abgeleitet. Man kann jede zu messende Größe in ähnlicher Weise aus diesen drei Grundeinheiten ableiten; nur sie bezeichnet man daher als *Grundeinheiten* des technischen Maßsystems.

Schreiben wir die Benennung in der an einigen Beispielen angedeuteten Art so, daß man erkennt, wie die betreffende Einheit aus den Grundeinheiten abgeleitet ist, so haben wir die *Dimension* der zu messenden Größe. $\left[\frac{\text{m}}{\text{sek}}\right]$ ist die Dimension der Geschwindigkeit, [m · kg] ist die der Arbeit oder des statischen Moments.

Achtet man auf die Dimensionen, so bewahrt das oft vor Fehlern in der Rechnung und kürzt manche Rechnung ab. Es ist daher gerade bei der Auswertung von Versuchsergebnissen oft nützlich, die Dimension zu beachten, wie einige Beispiele zeigen mögen.

Jede Gleichung, welcher Art auch immer, muß *homogen* sein, das heißt, die Dimension der beiden Seiten muß die gleiche sein. Andernfalls liegt ein Fehler im Ansetzen der Gleichung vor. Prüfen wir daraufhin einen bekannten Satz der Mechanik, nämlich den von der kinetischen Energie: $P \cdot s = \frac{1}{2} M \cdot w^2$. P ist die Kraft, die während des Weges s auf die Masse M wirkt und ihr dadurch die Geschwindigkeit w erteilt. P als Kraft hat die Dimension [kg]; s als Weg hat die Dimension [m]; w als Geschwindigkeit hat die Dimension $\left[\frac{\text{m}}{\text{sek}}\right]$, die quadratisch, also als $\left[\frac{\text{m}}{\text{sek}}\right]^2 = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{sek}^2}\right]$ einzuführen ist. Die Masse wird durch die Formel $M = \frac{G}{g} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Beschleunigung der Schwere}}$ definiert; die Beschleunigung ihrerseits ist die Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde, hat also die Dimension $\left[\frac{\text{m/sek}}{\text{sek}}\right] = \left[\frac{\text{m}}{\text{sek}^2}\right]$; daraus folgt die Dimension der Masse $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m/sek}^2}\right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}}\right]$. Wenn wir nun alle diese Dimensionswerte in die Formel $P \cdot s = \frac{1}{2} M w^2$ einsetzen, so kommt $[\text{kg}] \cdot [\text{m}] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}}\right] \cdot \left[\frac{\text{m}^2}{\text{sek}^2}\right]$. Die Zahl $\frac{1}{2}$ ist auf die Dimensionsbestimmung ohne Einfluß. Wir heben nun rechts sek^2 gegen sek^2 und m gegen m. Dann haben wir $[\text{kg} \cdot \text{m}] = [\text{kg} \cdot \text{m}]$. Die Gleichung ist also homogen. Solche Prüfung fördert oft Fehler zutage.

Man kann eine Geschwindigkeit statt in $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ auch in $\frac{\text{km}}{\text{st}}$ angeben, wie dies bei der Eisenbahn üblich ist. Die Gleichung $100 \frac{\text{km}}{\text{st}} = 27{,}8 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ist homogen; es kommt also nicht auf die Einheiten beiderseits an, son-

dern nur auf die Tatsache, daß beiderseits Länge durch Zeit geteilt wird. Es ist $100 \frac{\text{km}}{\text{st}} = 100 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ sek}} = \frac{100\,000}{3600} \frac{\text{m}}{\text{sek}} = 27{,}8 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

Daß jede Gleichung homogen sein muß, folgt daraus, daß sonst nicht die Wahl der Einheit ohne Einfluß auf das Ergebnis der Rechnung bliebe. Hat die linke Seite einer Gleichung die Dimension $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$, und man will auf die Einheit $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ übergehen, so wird die davorstehende Zahl hundertmal so groß; nur wenn auch auf der rechten Seite der Gleichung eine Länge im Zähler des Dimensionsbruches steht, wird auch dort der Koeffizient verhundertfacht, und die Gleichung bleibt dieselbe.

Weiterhin gewährt die Beachtung der Dimension Vorteile bei *Berechnung des Maßstabes von Schaubildern*: In einem Koordinatennetz (Fig. 1) stellen wir Kräfte P als Ordinaten dar, bezogen auf die Wege s des Angriffspunktes als Abszissen. Die Fläche F unter der Kurve ist dann die geleistete Arbeit $P \cdot s$, aber in welchem Maßstab? Das findet man am einfachsten so: Wir hatten P aufgetragen im Maßstab 1 cm = 100 kg, und s im Maßstab 1 cm = 0,5 m Weg des Angriffspunktes; dann folgt durch Ausmultiplizieren der beiden linken und der beiden rechten Seiten: 1 cm · 1 cm = 100 kg · 0,5 m; 1 qcm = 100 · 0,5 = 50 m · kg als Maßstab der Arbeiten. — Ein ähnliches Beispiel: Die Volumina eines Gases oder des Dampfes im Dampfzylinder sind als Abszissen aufgetragen, Maßstab: 5 cm = 1 cbm = 1 m³. Die zugehörigen Spannungen sind als Ordinaten verzeichnet, Maßstab: 2 cm = 1 at = 10 000 $\frac{\text{kg}}{\text{qm}}$ = 10 000 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$. Die Fläche unter der Kurve gibt bekanntlich die Arbeit, der Maßstab folgt aus 5 cm · 2 cm = 1 m³ · 10 000 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$; 10 qcm = 10 000 $\frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}{\text{m}^2}$; 1 qcm = 1000 m · kg. — Eine schwierigere Maßstabberechnung kommt in § 89 vor.

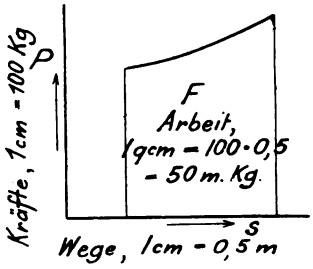


Fig. 1. Zur Berechnung des Maßstabes von Schaubildern.

3. Praktische Einheiten. Endlich sei noch bemerkt, daß in technischen Rechnungen nicht alle Einheiten auf die Grundmaße zurückgeführt sind; es ist eine Reihe von anderen Einheiten in Gebrauch. So gibt eine Dampfmaschine, die eine Stunde lang eine Pferdestärke entwickelt, eine Arbeit her, die man wohl als Pferdekraftstunde bezeichnet und als Arbeitseinheit annimmt. Man kann für sie die Dimension [PS · st] einführen und mit dieser Dimension (im weiteren Sinn) verfahren wie mit denen, die aus Grundeinheiten unmittelbar zusammengesetzt sind. Als Beispiel für die Bequemlichkeit und Sicherheit, die auch hier das Rechnen mit Dimensionen gewährt, diene die Umrechnung dieser Einheit in die frühere Arbeitseinheit, das Meterkilogramm, und weiterhin in Wärmeeinheiten.

Es ist

$$1\ \text{PS} = 75\ \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}};$$

$$1\ \text{PS} \cdot \text{st} = 75\ \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}} \cdot \text{st} = 75\ \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}} \cdot 3600\ \text{sek} = 75 \cdot 3600\ \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}} \cdot \text{sek};$$

$$1\ \text{PS} \cdot \text{st} = 270\,000\ \text{m} \cdot \text{kg}.$$

Wir wissen weiter, daß $1\ \text{m} \cdot \text{kg} = \frac{1}{427}\ \text{WE}$ ist (S. 332); also haben wir

$$1\ \text{PS} \cdot \text{st} = 270\,000\ \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \frac{1}{427}\ \frac{\text{WE}}{\text{m} \cdot \text{kg}} = 632{,}5\ \text{WE}.$$

Übrigens können wir noch in der Formel $1\ \text{PS} \cdot \text{st} = 632{,}5\ \text{WE}$ beiderseits mit st dividieren und haben auch $1\ \text{PS} = 632{,}5\ \frac{\text{WE}}{\text{st}}$.

Aus dem Vorstehenden geht hervor, daß für die Pferdekraftstunde nur die Schreibart 1 PS · st, nicht aber die oft zu findende 1 PS/st berechtigt ist.

4. Technische und physikalische Grundeinheiten. Als Grundeinheiten sind in der Technik, wie erwähnt, das Meter, die Kilogrammkraft und die Sekunde üblich. Die Physik verwendet statt dessen meist das Zentimeter, die Gramm-Masse und die Sekunde (c-g-s-System). Auf die Umrechnung von Angaben eines Maßsystems ins andere gehen wir nicht ein, heben nur hervor, daß im technischen System das Kilogramm die Einheit der Kraft ist; es ist diejenige Kraft, die ein Kilogrammgewicht bei mittlerer Breite und am Meeresspiegel, also bei rund 9,81 m/sek² Schwerebeschleunigung, auf seine Unterstützung ausübt. Die Masseneinheit folgt aus der Formel Masse = Kraft : Beschleunigung = $1\ \text{kg} : 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$; die Masseneinheit ist also $\frac{1}{9{,}81}\left[\frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}}\right]$. Im c-g-s-System aber ist das Gramm die Masseneinheit. Wegen der Formel Kraft = Masse · Beschleunigung = $1\ \text{gr} \cdot 981\ \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$ ist also die Krafteinheit $981\left[\frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}\right]$; sie heißt 1 Dyn.

Im technischen Maßsystem ist die Masseneinheit keine glatte Zahl und ihre Dimension ein zusammengesetzter Ausdruck; im physikalischen System ist dasselbe für die Krafteinheit der Fall. Das darf man bei Umrechnungen nicht übersehen.

II. Eigenschaften der Instrumente.

5. Allgemeine Eigenschaften. Man stellt an technische Meßinstrumente und Meßmethoden andere Anforderungen als an physikalische. Bei physikalischen Untersuchungen ist fast immer die größtmögliche Genauigkeit das maßgebende Ziel. Bei technischen Messungen muß dieser Gesichtspunkt zurücktreten. Das Haupterfordernis ist hier meist, die Ablesungen schnell zu machen. Das ist wünschenswert wegen der

großen Anzahl von Ablesungen und deswegen, weil größere Maschinen nicht leicht, insbesondere nicht ohne große Kosten, längere Zeit zu Versuchszwecken betrieben werden können; es ist auch wohl nötig, weil es sich fast immer um Feststellung schwankender Größen handelt.

Dem technischen Bedürfnis entsprechen daher am besten die Skaleninstrumente, bei denen die zu messende Größe an einer Skala abgelesen wird.

Die meisten Skaleninstrumente sind Zeigerinstrumente: ein um eine Achse drehbarer Zeiger spielt vor der Skala. Die Messung erfolgt mechanisch, so z. B. auch bei den üblichen Volt- und Amperemetern, bei Tachometern, Manometern u. a. Die zu messende Größe erzeugt eine *Richtkraft*, als messender Teil dient meist eine Meßfeder, deren Spannung mit wachsendem Ausschlag aus der Nullage zunimmt; seltener wird zur Messung ein Gewicht gehoben, dessen Moment in bezug auf eine Drehachse mit dem Ausschlag zunehmen muß (z. B. Neigungswage), sofern nicht in der allgemeinen Anordnung des Instrumentes eine Abnahme der Richtkraft mit zunehmendem Ausschlag begründet ist, so daß dadurch das statische Verhalten des Instrumentes gewahrt ist.

Die Flüssigkeitsmanometer, die Bifluidtachometer sind zwar Skalen- aber keine Zeigerinstrumente. Zeiger und Meßfeder sind bei ihnen durch die Flüssigkeitssäule ersetzt, deren Spannung mit wechselndem Ausschlag zunimmt.

Bei allen diesen Instrumenten sind für die Messung Energiemengen einzuführen im Betrage der Arbeit, die zum Zusammendrücken der Feder, zum Heben des Gewichts oder der Flüssigkeitssäule zu leisten ist. Mit der Messung ist also ein Energieumsatz im Innern des Instrumentes verbunden. Der *Energieumsatz* wird durch Wahl einer größeren und längeren Meßfeder, an die die übrigen Teile entsprechend angepaßt sind, größer; mit der Größe des Energieumsatzes wird der Einfluß von Störungen durch Reibung und andere Zufälligkeiten abnehmen. Insofern wächst also mit zunehmender Richtkraft (Direktionskraft) des Instrumentes die Genauigkeit der Ablesung, allerdings nur dann, wenn sich die störenden Einflüsse, insbesondere die Reibung, nicht zugleich vergrößern. Eine Vergrößerung der richtenden Kräfte ist daher einer Vergrößerung der Wege allgemein vorzuziehen.

Bei der Messung muß die der Richtkraft entsprechende Energie derjenigen Stelle entnommen werden, an der eine Größe gemessen werden soll. Stehen dort nur beschränkte Energiemengen zur Verfügung, so wird die Energieentnahme einen merklichen Fehler in der Messung insofern verursachen, als zwar die Messung selbst richtig erfolgen mag, aber eine Größe gemessen wird, die um den Betrag der Energieentnahme von der gewollten abweicht. So wird man, um den Druck in einem Windkessel zu messen, den Hahn zum Manometer öffnen müssen. Je größer nun (namentlich hinsichtlich der Direktionskraft) das Manometer ist, desto genauer wird der Druck gemessen werden, der nach erfolgtem Ausgleich zwischen Behälter und Manometerinnerem in beiden herrscht. Dieser Druck aber wird vom Behälterdruck vor Öffnen des Hahnes um so mehr abweichen, je mehr Luft beim Öffnen entnom-

men wird, je größer also das Manometer ist. So wird also eine bestimmte Instrumentengröße das beste Ergebnis liefern können — und bei kleinem Behälter kann es wohl vorkommen, daß sie überschritten wird; z. B. ist der Inhalt des Indikatorzylinders keineswegs immer verschwindend klein gegenüber dem des Maschinenzylinders, zumal gegenüber dem schädlichen Raum (vgl. § 91).

Übrigens muß in jedem Fall außer der zur Überwindung der Richtkraft nötigen Energie auch noch diejenige ins Instrument eingeführt werden, die bei der Bewegung des Meßwerkes durch Reibung und Dämpfung verloren geht. Ferner ist zu beachten, daß eine Reihe von Instrumenten dauernd Energie verbraucht, so die meisten der üblichen Volt- und Amperemeter, namentlich aber Hitzdrahtinstrumente, ferner Dampf- und Wassermesser und andere.

Bei der *Fernmeldung* wird die Meßenergie von einem gebenden Teil erzeugt und durch eine Leitung zum empfangenden und anzeigenden Teil geleitet werden müssen. Zwischen Geber und Empfänger findet also eine Energieübertragung statt. Für die Fernmeldung eignen sich daher diejenigen Instrumente, deren Wirkungsweise auf hydraulischen oder elektrischen Erscheinungen beruht.

Bei *registrierenden Instrumenten* wird die Angabe des Zeigers auf einem Papierstreifen aufgezeichnet, der sich meist zeitlich gleichmäßig abwickelt, also die Zeit zur Abszisse werden läßt. Zur Registrierung sind Instrumente von ausreichender Richtkraft zu verwenden, um die Reibung des Schreibstiftes auf dem Papier zu überwinden. Um bei Instrumenten von geringer Richtkraft eine Registrierung möglich zu machen, kann man den Zeiger mit dem Schreibstift lose vor dem Papier schweben lassen, und ihn nur in bestimmten Zeiträumen durch einen Bügel andrücken lassen. Man erhält so eine punktförmige Registrierung (Wattschreiber von Siemens & Halske und anderen). Wo die so einzuhaltenden Zeiträume zu groß werden und Feinheiten des Versuchs verloren gehen würden, kann man sich des Funkens zum Schreiben bedienen: vom Schreibstift zur Trommel schlägt der Funken durch das Papier; die Diagramme sind photographisch kopierfähig. Die Ergebnisse befriedigen nur bei großem Diagrammaßstab nach beiden Richtungen, weil der Funken sich durch Ungleichheiten des Papiers um $^1/_2$ mm vom kürzesten Wege ablenken läßt, auch besonders gerne in das vorhergehende Loch springt oder bei zu enger Lochstellung das Papier förmlich durchschneidet.

6. Statisches Verhalten. Wir wollen die wichtigen Eigenschaften der Meßinstrumente am Beispiel des Plattenfedermanometers erläutern, wie wir es von jedem Kessel her als aus der Anschauung bekannt voraussetzen dürfen; wir verweisen wegen seiner Wirkungsweise auf S. 55.

Wir prüfen das Manometer auf die Richtigkeit seiner Angabe, indem wir es an einen Raum anschließen, worin wir verschiedene bekannte — etwa mit Hilfe eines besonders zuverlässigen Instrumentes festgestellte — Spannungen erzeugen können, und indem wir die Angabe des Zeigers ablesen.

Bei einem vollkommenen Manometer würde die Skala so viel anzeigen, wie die Spannung beträgt. Wenn wir in Fig. 2 die Angabe des Zeigers als Abszissen und den richtigen Wert der Spannung als Ordinaten, beide in gleichem Maßstabe, auftragen, so werden wir eine unter 45° geneigte Gerade erhalten.

Im allgemeinen aber wird nach einigem Gebrauch die Teilung der Skala falsch zeigen: Wenn wir etwa 10 at (Atmosphären, S. 50) Spannung an das Instrument bringen, so zeige das Manometer 10,2 at. Tragen wir diesen Wert und die entsprechenden bei anderen Spannungen in ein Achsenkreuz ein, so erhalten wir ein Bild wie Fig. 2: Die Kurve, die wir als *Charakteristik* des Instruments bezeichnen können, weicht von der 45°-Linie ab; letztere ist zum Vergleich eingetragen. Die Charakteristik liegt unter der 45°-Linie, wenn das Instrument zu viel anzeigt, und umgekehrt.

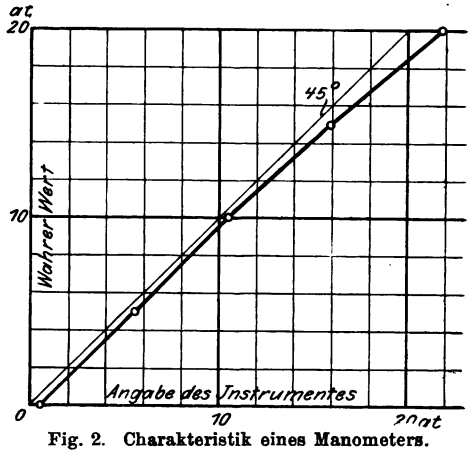


Fig. 2. Charakteristik eines Manometers.

Wenn ein Instrument in dieser Weise falsch zeigt, so ist das kein Schaden. Man braucht nur seine Charakteristik zu kennen, um aus den abgelesenen Werten die richtigen zu ermitteln. Man muß also die Charakteristik durch einen Vorversuch feststellen, den man als Eichung des Instrumentes bezeichnet. Die Eichergebnisse berücksichtigt man durch Anbringen einer Korrektion an den abgelesenen Werten (S. 20).

Das Falschzeigen eines Instrumentes macht dasselbe nicht im mindesten unbrauchbar. Anders ist es mit der Eigenschaft, die wir als *Ungenauigkeit* oder *Unempfindlichkeit* bezeichnen. Mit diesen Namen belegt man die Eigenschaft des Instrumentes, beim Aufgang anders zu zeigen als beim Abwärtsgang. Belastet man das Manometer mit 10 at, so möge es 10,2 at an der Skala angezeigt haben. Bringt man aber die Spannung erst auf 11 at und läßt sie vorsichtig auf 10 at zurückgehen, so möge der Zeiger auf 10,6 stehen bleiben, höher als das erstemal. Der Unterschied von 0,4 zwischen beiden Ablesungen rührt von der Reibung her: ohne Reibung würde sich der Zeiger stets auf 10,4 einstellen. Durch Erschütterung des Instrumentes beseitigt man die Reibung ganz oder teilweise.

Die Reibung hat zur Folge, daß wir die Spannung um 0,4 at ändern können, ohne daß der Zeiger eine Änderung anzeigt: daher der Name Unempfindlichkeit für diese Eigenschaft des Instrumentes; oder aber: die Reibung hat zur Folge, daß wir bei einer gewissen Angabe des Zeigers über den Wert der Spannung innerhalb eines Spielraumes von 0,4 at unsicher sind: daher der Name Ungenauigkeit für die gleiche Eigenschaft.

Nun kann aber noch die Angabe des Instrumentes von seinem vorhergehenden Zustand abhängig sein. Wenn wir das eben benutzte Manometer nicht nur bis 11 at belasten, sondern 20 at einen Augenblick wirken lassen und dann vorsichtig wieder auf 10 at herabgehen, so bleibt der Zeiger diesmal auf 10,8 stehen; vorhin zeigte er ebenfalls im Abwärtsgang 10,6. Hatten wir die Spannung von 20 at längere Zeit stehen lassen und gehen dann vorsichtig auf 10 at zurück, so bleibt der Zeiger sogar auf 11,1 stehen. Bei solchem Instrument würde also sowohl die Größe der vorher wirkenden Spannung als auch die Zeitdauer ihrer Wirksamkeit Einfluß auf die Angabe haben.

Solche Unregelmäßigkeiten würden vermutlich davon herrühren, daß die Feder, der wirksame Teil des Manometers, über die Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht war. Es sind *elastische Nachwirkungen.* Sie halten sich bei guten Instrumenten in engen Grenzen, sind durch Erschütterung nicht oder doch nicht ganz zu beseitigen.

7. Dynamisches Verhalten der Instrumente. Die bisherigen Darlegungen bezogen sich auf die Frage, auf welchen Stand der Zeiger eines Instrumentes zum Einspielen kommt. Es fragt sich nun, wie ein Instrument sich verhält, wenn die zu messende Größe sich ändert. Die zu messende Größe ändere sich von einem Wert, den sie konstant einhielt, sprungweise auf einen anderen Wert, den sie fortan konstant einhält; dann wünscht man, daß das Instrument sich möglichst prompt auf den neuen Wert einstellt und sein Zeiger in der neuen Stellung verharrt.

So möge in Fig. 3 der starke Strich $XABY$ den Verlauf der Spannung abhängig von der Zeit aufgetragen zeigen. Von A bis B ist die Spannung sehr schnell, das heißt in unmeßbar kurzer Zeit, angestiegen. Daß kein Instrument diesen Verlauf genau angeben kann, wird folgende Überlegung zeigen, bei der auch wieder das Plattenfedermanometer als Beispiel dienen möge.

Jede Ruhestellung des Zeigerwerkes kommt dadurch zustande, daß die von unten auf die Plattenfeder wirkende, von der zu messenden Spannung hervorgerufene Gesamtkraft gerade der elastischen Kraft das Gleichgewicht hält, die im Innern der Plattenfeder durch deren Deformation wachgerufen wird. Das war also auch während der Zeit XA der Fall. Eine Veränderung der Spannung nach $XABY$ zieht eine Störung des Gleichgewichtes und eben dadurch eine Verstellung des Zeigerwerkes nach sich. Zur Verstellung des Zeigerwerkes, das jedenfalls eine gewisse, wenn auch vielleicht geringe Masse besitzt, ist es notwendig, dieser Masse eine Geschwindigkeit, wenn auch vielleicht nur eine kleine, zu erteilen, und dazu ist das Vorhandensein einer beschleunigenden Kraft die Voraussetzung. Diese Kraft nun wird durch jene Störung des Gleichgewichtszustandes ausgelöst, indem zu gewissen Zeiten die zu messenden Spannungen und die Angaben des Instrumentes einander nicht entsprechen. Nachdem die Spannung bei A plötzlich ihren Wert geändert hat, wird sich das Getriebe gleichwohl nur allmählich in Bewegung setzen, Kurve AC, nämlich nur nach Maßgabe der Beschleunigungen, die dem jeweiligen Unterschiede zwischen der von der Spannung hervor-

gerufenen Kraft, gegeben durch ABC, und der durch die Zeigerstellung festgelegten Kraft der Plattenfeder, gegeben durch $\widehat{AC}$, entspricht. Die senkrechten Abstände von BC bis $\widehat{AC}$ sind ein Maß der richtenden Kräfte P, wagerecht sind die Zeiten t aufgetragen, also ist die schraffierte Fläche $ABC = \int P \cdot dt$ nach dem Satz vom Antrieb ein Maß für die Geschwindigkeit, die das Getriebe bis zum Punkte C angenommen hat, wenn die ganze durch das Nacheilen des Instrumentes freigewordene Energie in kinetische Energie verwandelt und nicht etwa durch Widerstände aufgezehrt ist. Im Punkt C enthält das Getriebe dann kinetische Energie, die den Zeiger über sein Ziel hinausschießen läßt. Da nun aber Kräfte im umgekehrten Sinne wachgerufen werden, entsprechend dem jeweiligen Unterschied zwischen den Spannungen CDF und der Plattenfederkraft CEF, so wird die kinetische Energie bis E hin, wo das Zeigerwerk zur Ruhe kommt, aufgezehrt sein, wenn die Fläche CDE gleich der Fläche ABC ist; bei F würde die gleiche Geschwindigkeit, jedoch im umgekehrten Sinne wie bei C, wieder vorhanden sein, und nun würde der Zeiger wieder bis G über die Gleichgewichtslage hinausschießen — ein Spiel, das nie zu Ende kommt, wenn das Getriebe widerstandslos wäre, wie wir es annahmen.

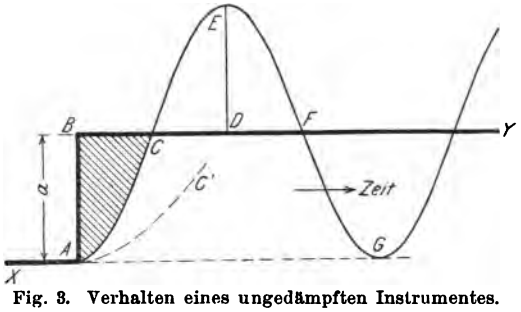


Fig. 3. Verhalten eines ungedämpften Instrumentes.

Stellen wir uns nun zwei Instrumente vor, mit gleicher Größe und Stärke der Plattenfeder, so daß also die Richtkraft gleich ausfällt, so bleibt dasjenige Instrument mehr zurück, dessen Triebwerkteile schwerer gehalten sind und größere Bewegungen auszuführen haben — dasjenige also, dessen Trägheit größer ist. Andererseits können wir uns zwei Instrumente denken, die im Triebwerk durchaus identisch sind; das setzt bei gleicher Skalenteilung voraus, daß die Plattenfedern für gleiche Spannungsänderungen gleiche Durchbiegungen erfahren; dem aber können wir gerecht werden, indem wir bei einem der Instrumente eine kleinere und zugleich schwächere, bei dem anderen eine größere und entsprechend stärkere Plattenfeder verwenden. Das erstere Instrument würde nun eine kleinere Richtkraft ergeben für einen bestimmten Unterschied zwischen der tatsächlich unter der Plattenfeder vorhandenen und der vom Zeiger gerade angezeigten Spannung. Das Instrument mit geringerer Richtkraft würde etwa — gleiche Trägheit vorausgesetzt — den Weg AC' einschlagen, wenn das Zeigerwerk des anderen nach AC sich zu bewegen gezwungen wird. Beide Einflüsse zusammengenommen, kann man sagen: Die Schwingungen werden um so kürzer sein, je kleiner die Trägheit des Instrumentes im Verhältnis zur Richtkraft ist. Diese beiden zusammen bestimmen den Verlauf der Kurve AC bei dem widerstandslos gedachten Getriebe, und bestimmen damit

die Anzahl der in einer Sekunde ausgeführten Schwingungen des Zeigerwerkes, seine *Eigenschwingungszahl.* Bezeichnen wir mit m die Masse der bewegten Teile, wobei die verschiedene Geschwindigkeit der verschiedenen Teile durch Reduktion der Massen auf einen bestimmten Teil, etwa auf den Angriffspunkt der Meßfeder am Getriebe, zu berücksichtigen ist — und bezeichnen wir mit c die Federkonstante der Feder, das heißt die Kraft, die an jenem Angriffspunkt angreifen muß, um ihn um die Einheit des Weges aus seiner Ruhelage zu verschieben, entgegen der wach werdenden Federspannung, so ist die Eigenschwingungszeit durch den Ausdruck

$$t_s = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gegeben. Die Eigenschwingungszahl $1 : t_s$ nimmt zu mit Verminderung der Trägheit oder der Masse der bewegten Teile und mit Vermehrung der Richtkraft[1]).

Nun hat jedes Instrument *Widerstände*; unvermeidlich sind jedenfalls die Reibung in irgendwelchen Lagerungen und der Widerstand der Luft, in der das Triebwerk seine Bewegungen ausführen muß. Die Widerstände im Triebwerk dämpfen die Schwingungen und lassen die Werte des Ausschlags allmählich abklingen; nur bei sehr starker Dämpfung wird jedoch die Anzahl der in der Sekunde stattfindenden Schwingungen gegenüber der Eigenschwingungszahl des widerstandslos gedachten Instrumentes wesentlich verändert. Es entstehen Bewegungen des Zeigerwerkes, die durch die Fig. 4 gegeben sind, in der die Kurve *1* wieder die ungedämpfte Schwingung der Fig. 3 darstellt.

Widerstände jeder Art bringen die Schwingungen zum Verschwinden, indem sie die Geschwindigkeitsfläche ABC der Fig. 3 aufzehren. Aber für die Brauchbarkeit des Instrumentes macht es einen wesentlichen Unterschied aus, ob die Widerstände mit Abnahme der Geschwindigkeit selbst abnehmen, etwa proportional der Geschwindigkeit oder proportional ihrem Quadrate oder einer anderen Potenz sind, wenn nur der Geschwindigkeit Null, dem Stillstand des Zeigerwerkes, ein Widerstand Null entspricht; oder aber ob die Widerstände nicht zugleich mit der Geschwindigkeit der Triebwerkbewegung gegen Null konvergieren, so daß sie also auch im Stillstand einen endlichen Wert haben. Letzteres ist bekanntlich die Eigenschaft der Reibung fester Körper aneinander, deren Betrag mehr oder weniger unabhängig von der Geschwindigkeit ist und der man sogar nachsagt, die Reibung der Ruhe sei größer als die der Bewegung. Die Widerstände hingegen, die von Flüssigkeiten oder von Gasen, namentlich von Luft, herrühren, werden zugleich mit der Geschwindigkeit zu Null, sie setzen daher nur der schnellen Bewegung wesentlichen Widerstand entgegen, die langsame Bewegung des Triebwerkes lassen sie ungestört zu; diese Art Widerstände bezeichnet man im Gegensatz zur Reibung im Trieb-

[1]) Genauere Begründung der Gesetze der Eigenschwingungen etwa in: Lorenz, Technische Physik, Band I, S. 63, 203.

werk als dessen Dämpfung (im engeren Sinne). — Es ist übrigens auch üblich, unter dem Namen Dämpfung (im weiteren Sinne) die Reibung und die eigentliche Dämpfung zusammenzufassen; man spricht dann von mechanischer und von molekularer Dämpfung und nennt ein Instrument, das beide Arten aufweist — was mehr oder weniger immer der Fall sein wird —, doppelt gedämpft.

Für die Brauchbarkeit des Instrumentes ist es also wesentlich, ob die Schwingungen durch rein molekulare Dämpfung oder ob sie durch Reibung, allein oder in Verbindung mit ersterer, vernichtet werden. Im ersteren Fall kann der Verlauf nach Kurve *2*, im letzteren nach Kurve *3* vor sich gehen. Reibung bedingt Unempfindlichkeit des Instrumentes (S. 7); sie bewirkt, daß der Zeiger nicht nur in der Soll-Lage BY in Ruhe verharren kann, sondern auch um so viel darüber oder darunter, wie dem Werte der Reibung entspricht. B' und B'' mögen die Angaben sein, die das Instrument macht, wenn man den Druck vorsichtig, von unten oder von oben her kommend,

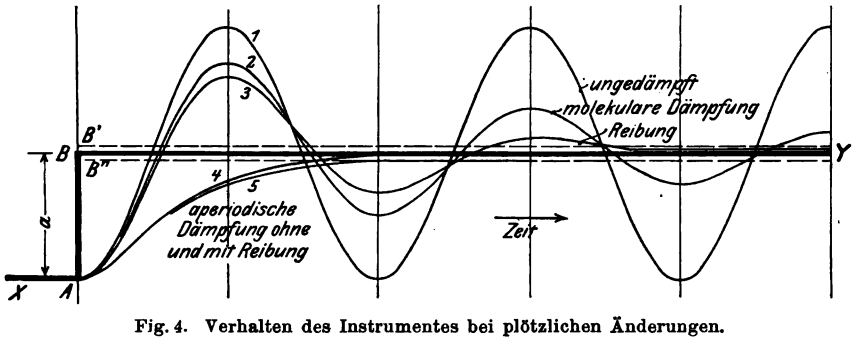


Fig. 4. Verhalten des Instrumentes bei plötzlichen Änderungen.

auf den Wert BY bringt. Unsere Schwingungen werden dann irgendwo zwischen B' und B'' zur Ruhe kommen, sobald die ausgelöste Geschwindigkeitsenergie aufgezehrt ist. — Die Reibung bewirkt also, daß wir innerhalb der durch B' und B'' gezogenen Grenzen über den wahren Wert der zu messenden Größe im unklaren bleiben. Wollte man im Interesse schneller Ablesung die Reibung verstärken, so würde man wohl ein schnelles Aufhören der Schwingungen erreichen, zugleich aber den Abstand $B'B''$ verbreitern und also die Ablesung ungenauer machen. Die Reibung ist also, wie auch hieraus wieder hervorgeht, schädlich.

Das Verhalten eines reibungsfreien, jedoch (molekular) gedämpften Instrumentes kann durch Kurve *2* zur Darstellung gebracht werden. Die Flächen über und unter der Soll-Lage BY werden kleiner und kleiner; doch werden die Flächen nie verschwinden, eben weil ja der ausgeübte Widerstand zusammen mit der Geschwindigkeit gegen Null konvergiert. Die Schwingungen werden also bei einem rein gedämpften Instrument nie ganz verschwinden; doch werden die Ausschläge um so schneller unmerklich, je stärker die Dämpfung ist, ohne daß selbst bei noch so starker Dämpfung die Endstellung des Zeigers von der

Soll-Stellung abwiche. Nicht die Reibung, sondern die molekulare Dämpfung ist also das Mittel, durch das man im Interesse schnellen Ablesens die Schwingungen zum Verschwinden bringen kann.

Das Abklingen rein gedämpfter Schwingungen geschieht in der Weise, daß die aufeinanderfolgenden Amplituden zwei ober- und unterhalb der BY-Achse liegende Exponentialkurven berühren, deren Abstände z von der Linie BY durch den Ausdruck $z = a \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{2m} \cdot t}$ dargestellt werden; ε bedeutet den Dämpfungsfaktor und gibt den Widerstand an, der im Angriffspunkt der Meßfeder — auf den auch m bezogen war — zu überwinden ist, wenn man den Angriffspunkt entgegen den Widerständen des Triebwerkes mit der Einheit der Geschwindigkeit bewegen will.

Man kann schreiben: $t = -2 \cdot \frac{m}{\varepsilon} \cdot \ln \frac{z}{a}$. Die Zeitdauer, die vergeht, bis die Ausschläge auf einen gewissen Bruchteil $\frac{z}{a}$ des Sprunges a herabgegangen sind, ist also proportional dem Verhältnis $\frac{m}{\varepsilon}$; sie läßt sich herabdrücken durch Vergrößern der Dämpfung oder durch Verringerung der Trägheit; die Federkonstante aber hat keinen Einfluß darauf, wie lange man mit der Ablesung warten muß, und so hat auch eine hohe Eigenschwingungszahl des Instrumentes in dieser Hinsicht keinen unbedingten Vorteil.

Bei stärkerer Dämpfung kommt es dahin, daß die gesamte, durch das Nacheilen des Instrumentes frei gewordene Energie schon in der ersten Teilschwingung aufgezehrt wird; das Instrument ist *aperiodisch*. Sein Verhalten wird dann durch Kurve *4* veranschaulicht: das Zeigerwerk geht ohne Schwingungen sanft in seine neue Stellung über. Man wird erkennen, daß ein ganz oder annähernd aperiodisches Verhalten des Zeigerwerkes eine sehr erwünschte Eigenschaft des Instrumentes ist. Neben dem Gesichtspunkt schneller Ablesbarkeit ist auch noch die Tatsache anzuführen, daß die Schwingungen das Zeigerwerk abnutzen. — Man könnte die Dämpfung noch über das Eintreten aperiodischen Verhaltens hinaus steigern; die Folge davon wäre aber, daß das Instrument erst später in seine neue Ruhestellung kommt, also würde die Ablesung unnütz verzögert.

Hat das aperiodisch gedämpfte Instrument noch Reibung, so macht es eine Bewegung nach Kurve *5*, es bleibt um den Betrag der Reibung von der Soll-Stellung entfernt.

Wo merkliche Reibung vorhanden ist, da ist ganz aperiodisches Verhalten des Instrumentes weniger gut als schwächer, jedoch ausreichend gedämpftes Verhalten: Es ist ein Verhalten nach Kurve *3* besser als ein solches nach Kurve *5*. Denn man pflegt den Einfluß von Reibung zu eliminieren, oder wenigstens das Vorhandensein von Reibung festzustellen, indem man das Instrument mehrfach in seine neue Lage kommen läßt, und die Übereinstimmung der einzelnen Ablesungen prüft. Ein nach Kurve *3* gedämpftes Instrument wird dann in wechselnden Stellungen zwischen den Linien B' und B'' zur Ruhe kommen, da-

durch das Vorhandensein von Reibung erkennen lassen, und namentlich durch Mittelwertbildung die Reibung unschädlich zu machen gestatten. Ein nach Kurve *5* gedämpftes Instrument aber wird — wenn man es nicht etwa abwechselnd von unten und von oben her in seine neue Lage kommen lassen kann — immer die Lage B'' annehmen, es wird besonders gut erscheinen, während man doch gerade bei ihm auch durch mehrfaches Ablesen und Mittelwertbildung keine besseren Ergebnisse erhält. —

Nun ist noch folgendes zu erwägen. Ein Verlauf der zu messenden Funktion nach dem Zuge $XABY$, Fig. 4, mit einem senkrechten Sprung von A nach B, ist praktisch unmöglich. Annähernd liegen solche Verhältnisse vor bei elektrischen Meßinstrumenten; zwar kann auch eine Änderung der Stromstärke nicht ganz plötzlich erfolgen wegen der Ladungserscheinungen und der Selbstinduktion; aber die Zeit, bis nach Herausreißen eines Schalters ein neuer Zustand eintritt, ist sehr klein im Verhältnis zur Eigenschwingungszahl des besten Instrumentes; wir können also Fig. 4 als für elektrische Instrumente unter Umständen gültig ansehen. Wo aber bei Messung mechanischer Größen auch die Wirkungen mechanischer Trägheit ins Spiel kommen, da kann sich ein neuer Zustand in den zu messenden Verhältnissen erst nach Verlauf einer gewissen Zeit einstellen — auch der Übergang in einen neuen Zustand findet in Form eines Schwingungsvorganges statt, der periodisch oder aperiodisch gedämpft ist. Wenn man die Spannung in einem Luftbehälter steigert, so ist dazu Einfüllen von Luft nötig, das Zeit erfordert; im allgemeinen wird sich der Druck im Behälter asymptotisch seinem neuen Sollwert nähern. Wenn man an einem Nebenschluß-Elektromotor die Umlaufzahl nachregelt, so nähert sich, wie ein angebrachtes Tachometer erkennen läßt, die Umlaufzahl asymptotisch dem neuen Wert.

In Fig. 5 ist das Verhalten von Instrumenten dargestellt, wenn in dieser Art eine allmählich verlaufende Änderung der zu messenden Größe vorliegt; als Gesetz der Änderung ist eine Exponentialkurve XY angenommen, über die sich nun die Eigenschwingungen des Instrumentes lagern. Eingezeichnet sind die Bewegungen eines ungedämpften, eines periodisch und eines aperiodisch gedämpften Instrumentes, doch ist nur an reibungsfreie Instrumente gedacht. Der Verlauf der Kurven ist durchaus der zu erwartende. Zur Beurteilung der Instrumente wäre zu bedenken, daß es keinen Zweck hat, das Instrument allzustark zu dämpfen; denn bevor die zu messende Größe nicht ihren neuen Wert annähernd erreicht hat, kann man das Instrument doch nicht ablesen. Außerdem hat jetzt die Eigenschwingungszahl des Instrumentes eine viel größere Bedeutung als früher. Bei Fig. 3 und 4 konnte eine noch so große Eigenschwingungszahl nichts daran ändern, daß die Amplituden dauernd die Größe des Sprunges a beibehalten, wenn man nicht durch Dämpfung für ihre Verminderung sorgte. In Fig. 5 aber fallen die Amplituden selbst beim ganz ungedämpften Instrument viel kleiner aus als der Sprung; und zwar fallen sie um so kleiner aus, je größer die Eigenschwingungszahl ist im Verhältnis zum

Verlauf der erregenden Exponentialkurve. Man kann jetzt also durch einfache Erhöhung der Eigenschwingungszahl Eigenschaften der Instrumente erzielen, die denen von gut gedämpften Instrumenten gleich oder überlegen sind, ohne daß die Instrumente überhaupt eine Dämpfung zu haben brauchen. Praktisch wird ja dann immer eine gewisse, wenn auch geringe Dämpfung zu Hilfe kommen. Im übrigen sollte man von aperiodischer Dämpfung aus den oben schon gegebenen Gründen so weit fernbleiben, daß das Instrument gerade noch schwache Schwingungen macht, wenn die zu messende Größe ihren neuen Wert erreicht hat. Dann kann man durch mehrfaches Ablesen die Reibung eliminieren. Die Dämpfung sollte also je nach der Geschwindigkeit gewählt werden, mit der die zu messende Größe sich ändert.

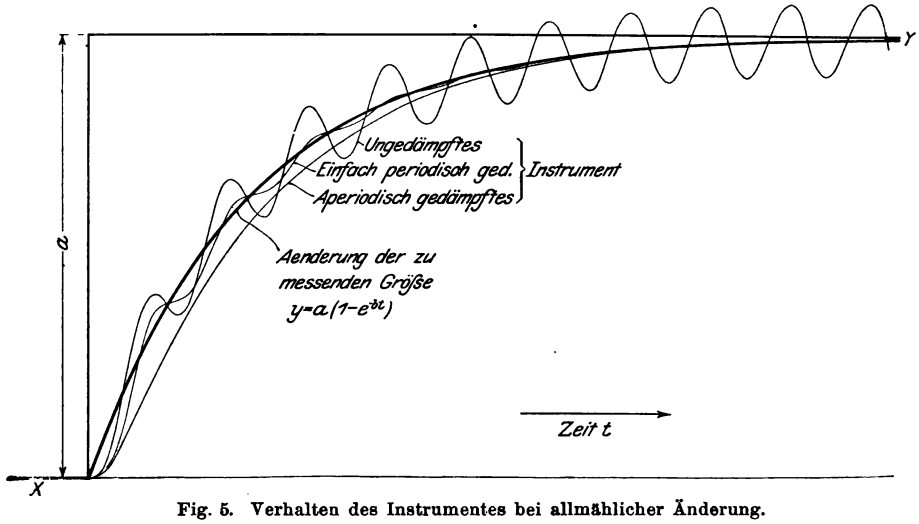


Fig. 5. Verhalten des Instrumentes bei allmählicher Änderung.

Erwähnt sei noch, daß es sich bei den Fig. 3 bis 5 um keinen bestimmten Maßstab, sondern überall nur um Verhältniswerte handelt — insbesondere auch für die Zeiten.

8. Konstruktionsregeln. Das Ergebnis unserer Betrachtungen können wir in folgende *Regeln für die Konstruktion von Meßinstrumenten* zusammenfassen, an welche die Forderung schnellen und genauen Anzeigens gestellt werden: Die Eigenschwingungszahl des Instrumentes ist durch Verringerung seiner Trägheit und durch Vergrößerung der verstellenden Kraft möglichst zu vergrößern; die Widerstände durch Reibung sind möglichst zu vermindern, die Dämpfung ist bis in die Nähe aperiodischen Verhaltens zu steigern, jedoch nicht weiter.

Konstruktiv kann man die Trägheit vermindern durch passende Anordnung der Teile und indem man sie möglichst leicht ausführt, etwa unter Verwendung von Aluminium. Die Vergrößerung der Richtkraft ist bei den verschiedenen Instrumenten in verschiedenster Weise zu erreichen, meist durch Vergrößerung der wirksamen Teile unter

gleichzeitiger Verstärkung der messenden Feder — wenn solche vorhanden ist; beim Plattenfedermanometer wäre, wie schon erwähnt, die Vergrößerung der freien Fläche der Feder unter gleichzeitiger Verstärkung das anzuwendende Mittel, beim Indikator die Vergrößerung des Kolbens, bei elektrischen Instrumenten die Vergrößerung der Windungszahl oder dergleichen; freilich haben solche Maßnahmen meist auch eine Vergrößerung der Masse im Gefolge, und das hebt die erstrebte Wirkung zum Teil wieder auf. Die Anwendung von Gewichten an Stelle von Meßfedern bürgt zwar in gewissem Grade für Unveränderlichkeit der Angabe, führt aber zu einer Vergrößerung der Masse, zumal da man mit Vergrößerung der verstellenden Kraft auch die Gewichte vergrößern muß. — Die Verringerung der Reibung ist durch sorgsame Arbeit, durch Anwendung von Steinlagern oder Spitzenlagerungen, oft auch durch bessere konstruktive Anordnung zu erreichen, die eine Verminderung der Lagerdrucke etwa durch Auswuchten der Teile oder die eine Verminderung der Reibungswege bezwecken kann. Was endlich die Dämpfung anlangt, so sind die anzuwendenden Mittel zu ihrer Vergrößerung: Einbau von Öl- oder Luftbremsen; bei Luftbremsen — in Luft umlaufenden Windflügeln — muß man meist durch Zwischenschaltung von Zahnrädern oder Hebelwerken für Vergrößerung des von den Flügeln gemachten Weges sorgen, da es ja auf Abtötung eines bestimmten Arbeitsbetrages ankommt. Auch Metallscheiben, vor permanenten Magneten spielend, ergeben eine Dämpfung durch Erzeugung von Wirbelströmen; die Scheiben können aus Aluminium bestehen. Bei Manometern vergrößert man die Dämpfung beliebig durch Abdrosseln des freien Querschnittes im Manometerhahn. —

Häufig werden freilich die Schwingungs- und Dämpfungsverhältnisse viel mehr durch die Art der Verwendung des Instrumentes als durch dieses selbst bestimmt; dann kann unter Umständen eine Änderung des Instrumentes wenig Vorteil bringen. Um immer dasselbe Beispiel zu nennen: ändert sich die Spannung einer Flüssigkeit plötzlich, so geht es nie ohne Schwingungen des Manometers ab; wenn aber die Plattenfeder eines Manometers Schwingungen ausführen will, so muß Flüssigkeit in das Manometer ein- und austreten: die Flüssigkeit im Manometerrohr muß die Schwingungen mitmachen. Je nach Länge und Weite des Manometeranschlusses können dann Schwingungszeiten und Dämpfungsverhältnisse eines und desselben Manometers ganz verschiedene sein. So wird auch in § 90 der große Einfluß besprochen, den beim Indikator die Wassermasse auf das dynamische Verhalten des Instrumentes beim Indizieren von Wasserpumpen ausübt.

Man mache es sich zur Regel, nur mit guten Instrumenten zu arbeiten. Keine Korrektion kann die Fehler eines schlechten Instrumentes unschädlich machen. Insbesondere versuche man nie, die Reibung durch Korrektion unschädlich zu machen. Ihr Betrag ist schwankend, und man weiß selten sicher, ob das Instrument aufwärts- oder abwärtsgehend in seine Lage gelangt ist. Es ist aber eine gute Regel, Korrektionen nur dann anzubringen, wenn sie sicher eine Verbesserung bedeuten.

9. Messung periodisch schwankender Größen. In zahlreichen Fällen sind Größen zu messen, deren Wert regelmäßigen Schwankungen unterliegt. So schwankt bei Kolbenmaschinen eine Reihe von Größen im Takte des Maschinenganges.

Die Aufgabe bei der Messung kann in solchen Fällen eine zwiefach verschiedene sein. Entweder man will den Mittelwert kennen, oder man will die Schwankungen selbst verfolgen, etwa das Gesetz ergründen, dem sie gehorchen. Im ersten Fall muß das Instrument die Schwankungen nach Möglichkeit nicht mitmachen, im letzteren Fall soll es sie mitmachen und dann meist graphisch aufschreiben.

Für die *Messung des Mittelwertes* muß das Instrument eine genügend starke Dämpfung besitzen. Es ist bekannt, wie man an den Manometern einer Dampfmaschine die Manometerhähne abdrosselt, bis die Bewegungen der Zeiger klein genug sind, um die Ablesung zu gestatten.

Die Ablesung wird oft erst dann befriedigend werden, wenn man die Schwankungen fast ganz abgedrosselt hat; denn man pflegt bei einem stärker schwankenden Instrument das arithmetische Mittel der äußersten Zeigerstellungen abzulesen; dieses ist aber durchaus nicht immer der zeitliche Mittelwert der beobachteten Größe; so hat beim Admissionsmanometer einer Dampfmaschine der Druck während des größten Teils der Zeit seinen Höchstwert und zuckt nur während der kurzen Admissionszeit abwärts. — Übrigens würde man ein Stillstehen des Instrumentes gegenüber periodischen Schwankungen außer durch Vergrößerung der Dämpfung auch durch Verminderung der Eigenschwingungszahl (Vergrößerung der Trägheit und Verkleinerung der verstellenden Kraft) erreichen, die nach § 7 eine Nacheilung des Instrumentes im Gefolge hat. Doch ist dieses Mittel weniger gut, weil es das Instrument gegenüber Einzelimpulsen weniger brauchbar macht (§ 7). Immerhin braucht man bei Instrumenten zur Messung des Mittelwertes nicht auf allzu hohe Eigenschwingungszahl bedacht zu sein.

Auch das Thermometer folgt schnellen Temperaturschwankungen nicht. Hier rührt die Eigenschaft davon her, daß die Wärme Zeit braucht, um sich dem Quecksilber mitzuteilen.

Wenn es sich nicht um Messung des Mittelwertes, sondern um *Untersuchung der Schwankungen* handelt, so wird das Instrument eben so wenig wie in den Fällen der Fig. 3 bis 5 den Verlauf der zu messenden Größen genau aufzeichnen können. Abweichungen der jeweiligen Triebwerkstellung von dem Sollwert sind es ja erst, die eine verstellende Kraft frei werden lassen und dadurch die Beschleunigung der Massen des Instrumentes ermöglichen. Die freigewordene Arbeit setzt sich auch hier in Schwingungen um, die durch Dämpfung zu beseitigen wären. Nur darf man im jetzigen Fall die Dämpfung nicht weit treiben, will man nicht neben den Eigenschwingungen des Instrumentes auch die Triebwerkbewegung abfangen, die uns die zu messende Größe selbst zeigen soll; auch vermehrt ja die Dämpfung die Nacheilung des Instrumentes. Wenn also eine Abdämpfung der Schwingungen, die sich über die Darstellung des zu untersuchenden Vorganges lagern, nicht tunlich ist, so müssen wir dafür sorgen, daß die Ursache der Schwin-

gungen möglichst beseitigt wird. Als solche erkannten wir in den Darlegungen zu Fig. 3 das Auftreten der Energiefläche ABC. Wir müssen also das Instrument zu schnellerem Nachfolgen zwingen durch Verminderung seiner Masse und Vergrößerung der verstellenden Kraft — das heißt, wir verkleinern die in Schwingungen umgesetzte Energie durch Erhöhung der Eigenschwingungszahl des Instrumentes. Die Eigenschwingungszahl des Instrumentes sollte jedenfalls erheblich größer sein als die wesentliche Periode der zu messenden Änderungen.

Die wichtigsten Fälle, wo periodisch schwankende Größen zu verfolgen sind, sind die Spannungsschwankungen im Zylinder einer Kolbenmaschine und die Geschwindigkeitsschwankungen im Gange von Maschinen. Erstere werden mit dem Indikator, letztere mit dem Tachographen untersucht. Wir kommen daher insbesondere bei Besprechung des Indikators auf die auftretenden Schwingungen und ihre Berücksichtigung zurück (S. 289 und 290).

10. Gleichmäßigkeit der Skala. Es liegt in der Wirkungsweise mancher Meßinstrumente, läßt sich auch wohl durch konstruktive Bemessung des Zeigerwerks erreichen, daß ihre Skala eine *gleichmäßige* ist; so pflegt bei Manometern die Länge einer Atmosphäre über das ganze Instrument hin dieselbe zu sein. Man kann dann in allen Teilen der Skala mit gleicher absoluter Genauigkeit ablesen, etwa überall auf 0,1 at; die relative Genauigkeit der Ablesung, ausgedrückt in Prozenten des abgelesenen Druckes, nimmt dann mit steigendem Druck zu.

Eigentlich ist es richtiger, relativ gleiche Genauigkeit zu erstreben; dann muß die Skala, gleich der des Rechenschiebers, eine *verjüngte Teilung* haben; die Abstände der Teilstriche werden allmählich kleiner. Solche Anordnung ist seltener; an Tachometern kommt sie vor.

Im Gegensatz dazu haben andere Instrumente eine *erweiterte Skala*; die Teilstriche stehen bei Null dicht aufeinander, später vergrößern sich die Abstände. Das kann praktisch sein, weil man dann den Meßbereich, in dem das Instrument meist benutzt werden soll, deutlich machen kann auf Kosten des übrigen. Ablesungen in der Nähe des Nullpunktes werden aber ganz unbrauchbar. Das Instrument büßt also zugunsten des Sonderzweckes seine Vielseitigkeit ein.

Zwischen beiden Extremen hält die gleichmäßige Teilung die gute Mitte.

Das Gesagte bezieht sich nicht nur auf Meßinstrumente, sondern auch auf *Meßmethoden*. Bei Mengenmessungen mit Durchflußöffnungen liest man den Druckverlust ab (§ 59). Dieser ist proportional dem Quadrat der Menge, er wird also bei kleinen Mengen besonders gering. Die Meßart ist also günstig hinsichtlich der Empfindlichkeit bei genügend großer Menge; bei kleiner Menge wird die Messung ungenau, der Meßbereich ist also gering. — Ist bei Wehrmessungen (§ 58) der Zusammenhang zwischen abgelesener und gesuchter Größe der umgekehrte, so ist hier die Messung überall gleichmäßig befriedigend, aber nirgends besonders gut.

Man führt auch gleichmäßige Skalen *mit unterdrücktem Nullpunkt* aus: die Skala beginnt erst mit einem höheren Wert als Null. Auch

hier kann der meistbenutzte Meßbereich besser hervorgehoben werden; doch ist es ein schwerwiegender Fehler, daß man nicht mehr sehen kann, ob der Zeiger in der Ruhe auf Null einspielt: die *Nullpunktskontrolle* ist aber die bequemste Art, wie man sich jederzeit von der Unversehrtheit des Instrumentes überzeugen kann. — Besonders zu verwerfen ist es, wenn bei Manometern ein kleines Stück am Anfang der Teilung unterdrückt wird und ein Anschlagstift den Zeiger zwingt, auf einem Nullpunkt zu stehen, der nicht der Nullpunkt der Skala ist; hier liegt die bewußte Absicht vor, das Instrument unversehrt scheinen zu lassen. Der Anschlagstift gehört etwas jenseits des Nullpunktes.

Bei Instrumenten mit ungleichmäßiger Skala hat man vorsichtig beim Anbringen einer Korrektion an der Ablesung zu sein. Z. B. gibt es Manometer, die zugleich als Thermometer dienen, indem man aus dem Druck des gesättigten Dampfes auf seine Temperatur schließt. Die Teilung pflegt für den Druck gleichmäßig, für die Temperatur aber verjüngt zu sein. Stimmt nun die Nullpunktskontrolle nicht, so liegt das seltener am Werk, meist hat sich einfach der Zeiger um einen kleinen Winkel verschoben, und die Korrektion macht überall diesen kleinen Winkel aus. Für den Druck ist die Korrektion also konstant, man zieht das ab, um wieviel der Zeiger in der Ruhe von Null abweicht. Für die Temperatur aber ist die Korrektion, wegen der Ungleichmäßigkeit der Teilung, an jedem Punkt eine andere, und man darf nicht einfach so viel Temperaturgrade zuzählen, wie die Abweichung von Null angibt.

11. Skalen- und Ausgleichinstrumente. Die Angaben der letzten Paragraphen bezogen sich auf Skaleninstrumente, die den Momentanwert irgendeiner Größe an einer Skala abzulesen gestatten, oder ihn auf einem Skalenblatt selbsttätig aufschreiben.

Die gewöhnliche Wage, die Dezimalwage, und manche andere Instrumente kann man als Ausgleichinstrumente bezeichnen: das zu messende Gewicht wird durch Gewichtsstücke auf der anderen Schale oder durch Verschieben des Laufgewichtes ausgeglichen; die Ablesung erfolgt, nachdem man durch Probieren die Zunge zum Einspielen gebracht hat.

Die Ausgleichinstrumente eignen sich nicht zum Aufzeichnen des Verlaufes schwankender Größen. Von einer Eichung im Sinne wie bei Skaleninstrumenten kann man bei ihnen nicht sprechen: eine Wage hat das vorgeschriebene Hebelverhältnis genau oder in gewissem Betrage falsch. Der Fehler ist aber im wesentlichen der gleiche für alle Belastungen, wenn nicht unzulässig starke Deformationen auftreten. Dagegen kann man von Empfindlichkeit genau so sprechen wie bei Skaleninstrumenten. Auch eine Eigenschwingungszahl, abhängig von der Trägheit und der durch Abweichungen aus der Gleichgewichtslage hervorgerufenen verstellenden Kraft, sowie eine Dämpfung sind diesen Instrumenten eigen, wenngleich diese Eigenschaften von geringerer Wichtigkeit für die Handhabung sind.

12. Totalisierende Instrumente. Eine weitere Gattung von Instrumenten können wir unter dem Namen „intregrierende oder totalisierende Instrumente" zusammenfassen. Gas- und Wassermesser, Um-

laufzähler, Anemometer geben nicht den augenblicklichen Wert irgendeiner Größe, etwa die augenblickliche Wasser- oder Gaslieferung, die augenblickliche minutliche Umlaufzahl, die augenblickliche Windgeschwindigkeit an, sondern sie zeigen, wieviel Wasser im ganzen durch den Messer gegangen ist, wieviel Umläufe die Maschine im ganzen gemacht hat, wieviel Meter Windweg im ganzen am Meßort vorbeigegangen sind. Sie integrieren die Augenblickswerte, und zwar meist über der Zeit als Abszisse. — Über die Ablesung totalisierender Instrumente im zeitlichen Vergleich zu Momentanwerten vergleiche man S. 272.

Wenn ein Skaleninstrument den Augenblickswert x einer Größe mißt und dessen Schwankungen in der Zeit t anzeigt, mißt das zugehörige totalisierende Instrument den Wert $y = \int x \cdot dt$ und zeigt dessen Zunahme — bei rückmessenden Instrumenten auch dessen Abnahme — an. Es führt also eine mechanische Integration aus, die entweder durch die Natur des Meßwerkes gemacht wird (Wassermesser, Umlaufzähler) oder einem besonders angebauten Integrierapparat übertragen werden kann (Gehres Dampfmesser, Fig. 149, und ähnlich die Arbeitszähler Fig. 264 die jedoch über dem Kolbenweg als Abszisse integrieren). An Stelle der mechanischen Integration kann jederzeit die von Hand treten: indem man die Augenblickswerte x häufig genug abliest und sie dann aufzeichnet oder auch wohl sie direkt registrieren läßt, erhält man eine Kurve $x = f(t)$, und findet das zugehörige $y = \int x \cdot dt$ durch Planimetrieren mittels des Planimeters. Dieses Verfahren wird z. B. bei Dampfmessern noch vielfach zum Ermitteln des gesamten Durchganges angewendet. Nicht jede Registrierung aber dient diesem Zweck (registrierende Manometer, Thermometer), da nicht immer die Fläche $\int x \cdot dt$ einen physikalischen Sinn hat.

Umgekehrt findet man aus den zunehmenden Werten y eines totalisierenden Instrumentes die Augenblickswerte $x = \frac{dy}{dt}$ als Neigung der Kurve $y = f(t)$, die man durch häufiges Ablesen von y ermittelt; die Neigung mißt man mit dem Spiegelderivator (§ 81). Oder näherungsweise findet man $x \backsim \frac{\Delta y}{\Delta t}$, indem man die Zunahme von y in gegebener Zeit oder (oft genauer, § 14) die zum Erreichen einer bestimmten Zunahme Δy erforderliche Zeit Δt beobachtet.

Bei den totalisierenden Instrumenten schadet eine falsche Angabe so wenig wie bei Skaleninstrumenten. Nur hat eine Eichung festzustellen, wieviel das Instrument zu viel oder zu wenig anzeigt. Für Maschinenuntersuchungen im Beharrungszustande kann man die Eichung bei der Geschwindigkeit vornehmen, mit der das Instrument gebraucht wird. Wo aber ein integrierendes Instrument im langsamen und schnellen Gang gebraucht wird, da ist zu fordern, daß die Angabe bei allen Gangarten um gleich viel, und zwar prozentual, nicht absolut, von der richtigen Angabe abweiche, daß also der anzuwendende Korrektionsfaktor für alle Gangarten der gleiche sei. Solange während der ganzen Meßdauer die Anlaufgeschwindigkeit überschritten ist, genügt es auch,

wenn die Beziehung zwischen Ablesung und wahrem Wert eine lineare sei, so daß man für jede Minute der Beobachtungsdauer einen bestimmten Zuschlag zur Ablesung zu machen hat. Das genügt also im allgemeinen bei Versuchsgeräten, nicht aber bei Betriebsgeräten.

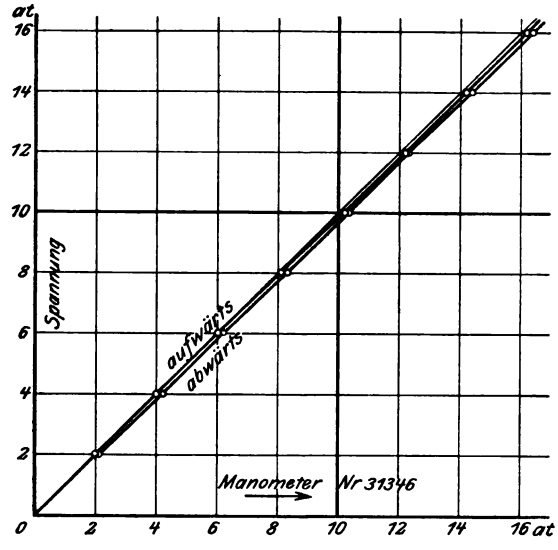


Fig. 6. Darstellung der Eichergebnisse.

13. Ausführung von Eichungen, Darstellung der Ergebnisse. Die Eichung eines Skaleninstrumentes besteht nach dem früher Gesagten darin, daß man die Richtigkeit seiner Angabe prüft oder feststellt, wieviel seine Angabe vom wahren Wert abweicht. Große Abweichungen zwischen Aufwärtsgang und Abwärtsgang sind unzulässig. Bei kleinen Abweichungen nimmt man das Mittel aus beiden. Das Ergebnis der Eichung kann man in Form eines Linienzuges graphisch darstellen, den wir als *Charakteristik* bezeichneten. Wir tragen dazu die Angaben des zu prüfenden Instrumentes als Abszissen, die wahren Werte, also etwa die Angaben eines Normalinstrumentes, als Ordinaten auf. Der entstehende Linienzug ist eine Gerade unter 45°, wenn das Instrument richtig zeigt, sonst weicht er von dieser Geraden ab (Fig. 6). Hat man mit dem so geeichten Instrument eine Ablesung gemacht, so braucht man nur in der Charakteristik diesen abgelesenen Wert als Abszisse aufzusuchen, die zugehörige Ordinate ist der wahre Wert, mit dem man statt des abgelesenen zu rechnen hat.

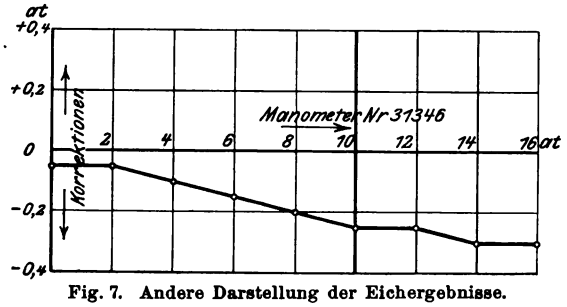


Fig. 7. Andere Darstellung der Eichergebnisse.

Bequemer ist die Darstellung der Eichergebnisse in einer anderen Form, wenn man nämlich als Ordinaten nicht die wahren Werte, sondern die anzuwendenden Korrektionen aufträgt. Die *Korrektion* ist der Betrag, den man zum abgelesenen Wert zuzählen muß, um den wahren zu erhalten; die Korrektion ist die negativ genommene Abweichung der Instrumentenangabe vom wahren Wert. Da die Korrek-

tionen kleine Werte sind, so kann man sie in größerem Maßstab auftragen als die Ablesungswerte, etwa im zehnfachen Maßstab; dadurch eben wird die Benutzung dieser Darstellungsart bequem. Fig. 7 gibt Resultate der Fig. 6 in solcher Form.

Als Zahlenbeispiel geben wir die Eichung eines Manometers wieder:

Wahrer Wert d. Spannung:	0	2	4	6	8	10	12	14	16	at
Angabe des Instrumentes: aufwärts:	0	2	4	6,1	8,1	10,2	12,2	14,2	16,2	„
Angabe des Instrumentes: abwärts:	0,1	2,1	4,2	6,2	8,3	10,3	12,3	14,4	16,4	„
Mittel:	0,05	2,05	4,1	6,15	8,2	10,25	12,25	14,3	16,3	„
Abweichg. v. wahren Wert:	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3	„
Korrektion:	-0,05	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,3	„

Die Darstellung dieses Ergebnisses in Fig. 7 sieht sonderbar sprunghaft aus. Das kommt davon, daß die Korrektionen vergrößert sind. Große Unregelmäßigkeiten im Gang der Instrumente deuten sonst an, daß etwas nicht in Ordnung ist.

Man soll alle Instrumente eichen, welche einer Eichung fähig sind, und zwar vor und nach Anstellung der Versuche. Stimmen beide Eichungen genügend überein, so hat das Instrument sicher beim Transport oder bei den Versuchen keinen Schaden erlitten, der seine Gangart geändert haben könnte. Die Eichung vor den Versuchen sichert außerdem davor, daß eine Versuchsreihe ganz vergebens gemacht ist, wenn ein wichtiges Instrument während der Versuche zerbricht, so daß man es nicht mehr eichen kann.

III. Beobachtung und Auswertung.

14. Ablesung. Jede Messung besteht in einer Beobachtung irgendwelcher Instrumente; an diese schließt sich die Auswertung an, wenn nicht etwa das Instrument die gesuchte Größe unmittelbar und auch gleich richtig anzeigt — was selten der Fall ist.

Selbst die einfachste Ablesung erfordert einige Aufmerksamkeit, wenn man als erstrebenswertes Ziel im Auge hat, mit möglichst wenig Zeitaufwand Ergebnisse von möglichst großer oder doch dem Zweck entsprechender Genauigkeit zu erzielen.

Bei vielen Instrumenten, so bei dicken Maßstäben oder Manometern, wird die Ablesung falsch, wenn man beim Beobachten nicht senkrecht auf die betreffende Stelle der Skala schaut. Diesen allbekannten *parallaktischen Fehler* zu vermeiden, ist der Zweck eines Spiegels, den man, parallel zur Skala, namentlich bei elektrischen Instrumenten, findet. Verdeckt der Zeiger sein Spiegelbild, so sieht man senkrecht auf die Skala. Gelegentlich ist auch die Skala selbst auf der Glasseite eines Spiegels angebracht: man sieht senkrecht auf die Skala, wenn die Striche der Skala sich mit ihrem Spiegelbild decken.

Außerdem hat man beim Ablesen von Skaleninstrumenten, soweit solche der Reibung in ihrem Getriebe unterworfen sind (Manometer, Barometer, Hygrometer), das Instrument durch *Anklopfen* zu erschüttern, um die Reibung zu beseitigen oder doch zu mindern.

Als Beispiele dafür, durch wie *einfache Maßnahmen* man oft die Genauigkeit der Ablesung vergrößern kann, womöglich unter gleichzeitiger Zeitersparnis, mögen die folgenden aufgeführt sein.

Die minutliche Umlaufzahl einer Maschine soll gemessen werden. Es steht eine Stechuhr (S. 71), eventuell noch ein an der Maschine angebrachtes Zählwerk zur Verfügung; sonst müßte man die Umläufe durch Zählen selbst feststellen. Nun wird oft so verfahren, daß man eine Minute lang beobachtet und den Unterschied des Zählerstandes oder die abgezählte Umlaufzahl notiert. Die Genauigkeit ist indessen unbefriedigend, außer wenn die Maschine recht schnell läuft. Hat man etwa 51 Umläufe gezählt, so ist selbst bei sorgsamster Beobachtung auf Fehler bis zu 1% zu rechnen; denn da man nur volle Umläufe beobachten kann, so wird man 51 zählen, immer wenn die Maschine zwischen 50,5 und 51,5 Umläufe in der Minute macht. Wollte man, um Zeit zu sparen, nur eine halbe Minute beobachten, so würde man voraussichtlich 25 Umläufe beobachten und hätte auf Fehler bis zu 2% zu rechnen. Und doch kann man in dieser Zeit befriedigende Ergebnisse haben, wenn man das Verfahren umkehrt. Man beobachtet die für 25 volle Umläufe nötige Zeit durch Drücken auf die Stechuhr; sie sei 29,2 sek, eine Ablesung, die auf weniger als $^1/_2$% Fehler rechnen darf, da die Stechuhr in $^1/_5 = 0{,}2$ sek geteilt ist, so daß die Ablesung voraussichtlich um nicht mehr als 0,1 sek über oder unter dem wahren Wert liegt, das sind etwa 0,35% von 29,2. Die Umlaufzahl errechnet sich nun leicht zu 51,4 Uml/min, mit einem höchsten Fehler von auch 0,35%. In beiden Fällen wäre gleichmäßig die Möglichkeit ungenauen Beobachtens vorhanden, die den höchsten Fehler etwas größer werden läßt. — Man erkennt, warum die zweitgenannte Art der Beobachtung genauere Ergebnisse liefert: man kann nur volle Umläufe, aber $^1/_5$ sek ablesen; letzteres ist die relativ kleinere Einheit. Bei hohen Umlaufzahlen würde die Beobachtung der Zeit für eine bestimmte Zahl von Umläufen das Genauere sein — dann nämlich, wenn mehr als ein voller Umlauf auf $^1/_5$ sek kommt, also bei mehr als 300 Uml/min.

Ein anderes Beispiel: Bei dem Eichdiagramm einer Indikatorfeder, Fig. 225, S. 276, sollen die Abstände der Linien voneinander, die je 1 at Drucksteigerung entsprechen, ausgemessen werden. In gewissem Sinne das nächstliegende ist es, einen Maßstab zunächst so anzulegen, daß man den Abstand von 0 bis 1 at ablesen kann, dann ihn bei 1 at neu anzulegen und den Abstand 1 bis 2 at abzulesen und so fortzufahren. Wollte man aber die Ablesungen zusammenzählen, so würde sich voraussichtlich nicht der richtige Wert für den Abstand von 0 bis 12 at ergeben, weil sich die jedesmaligen Fehler beim Anlegen leicht zueinander addieren. Besser legt man daher den Anfang des Maßstabes nur einmal bei 0 at an und liest gleich die Lage jeder der Linien auf $^1/_{10}$ mm genau ab; bildet man Differenzen, so hat man den Abstand der einzelnen

Linien voneinander. Man vermeidet so die Fehler beim Anlegen, die insbesondere dann unvermeidlich sind, wenn die Strichstärke nicht sehr gering ist.

Die beiden Beispiele sollen, wie erwähnt, als Beleg dafür dienen, daß selbst die allereinfachsten und elementaren Messungen nicht ohne Überlegung ausgeführt werden dürfen, wenn man auf genaues Messen Anspruch macht.

15. Übliche Fehler bei der Auswertung. An die einfachen Darlegungen über die Beobachtung mögen zunächst einige ebenso einfache über die Auswertung angeschlossen werden.

Bei Angaben in *Prozenten* kommen oft Fehler in die Rechnung. Man hat gut darauf zu achten, in Prozenten von welcher Größe die Angabe gemacht ist. Wenn wir in einem Aufsatz lesen; der Betrieb mit Spiritus kostet 12 Pf. für die Pferdekraft-Stunde, der Benzinbetrieb nur 8 Pf./PS · st, „letzterer sei also 50% billiger", so ist das falsch. Jeder, der hört, Spiritusbetrieb koste 12 Pf. und Benzinbetrieb sei 50% billiger, rechnet 6 Pf. für den Benzinbetrieb heraus. Richtig sind die Folgerungen: Benzinbetrieb ist $33^1/_3$% billiger, oder aber: Spiritusbetrieb ist 50% teurer als der andere; diese beiden Folgerungen sagen, trotz der verschiedenen Zahlen, das gleiche aus. Einmal bezieht man die Prozentrechnung auf 12 Pf., einmal auf 8 Pf. als 100%.

Braucht man 100 Pferdestärken, und hat die zu verwendende Maschine einen Wirkungsgrad von 60%, gehen also 40% in ihr verloren, so hat man der Maschine nicht 100 + 40 = 140 PS zuzuführen, sondern $\frac{100}{0{,}6} = 166{,}7$ PS. Wirkungsgrad und Verlust gibt man nämlich in Prozenten der eingeführten Energiemenge an, nicht der herausgehenden.

Braucht eine Dampfmaschine 200 kg Dampf in der Stunde, und schätzt man den Verlust durch Kondensation in der Rohrleitung auf 10%, so muß der Kessel nicht 220 kg, sondern 200 : 0,9 = 222 kg Dampf erzeugen. Die Angabe der Kondensationsverluste pflegt nämlich in Prozenten der erzeugten Dampfmenge zu geschehen, nicht der ankommenden.

Ist für einen Kessel 70 % Wirkungsgrad mit einem Spielraum (Toleranz) von 5 % gegeben, so gilt die Zusage als erfüllt, wenn der gemessene Wert um 5% von 70 hinter dem angegebenen zurückbleibt, also bei 66,5 % gemessenem Wirkungsgrad; der Wirkungsgrad darf nicht etwa nur 70 — 5 = 65 % sein.

Fehler, meist freilich von geringerer Tragweite, laufen beim *Bilden von Mittelwerten* unter. Um den Inhalt eines zylindrischen Gefäßes zu bestimmen, würden wir seine Höhe messen, außerdem den lichten Durchmesser. Da nun das Gefäß ungenau hergestellt ist, so wird der Durchmesser nicht überall genau derselbe sein; wir messen also eine Reihe von Durchmessern, etwa von 20 zu 20 cm Höhe, berechnen den mittleren Durchmesser d_m und dann den Inhalt $V = \frac{d_m^2 \pi}{4} \cdot h$. Dieses Verfahren ist mathematisch falsch und als praktische Näherungsmethode nur dann brauchbar, wenn die einzelnen gemessenen

Durchmesser nicht sehr voneinander abweichen. Das richtige, aber umständlichere Verfahren ist es, aus jedem gemessenen Durchmesser d die Fläche $f = \frac{d^2\pi}{4}$ zu bilden, das Mittel f_m aus diesen Flächen zu berechnen und nun das Volumen $V = f_m \cdot h$ zu finden. Ein anderes, bisweilen bequemeres Verfahren ist es, den *quadratischen Mittelwert* der Durchmesser zu bilden — dieser Ausdruck ist aus der Wechselstromtechnik übernommen — und zur Berechnung der mittleren Fläche zu verwenden. Der quadratische Mittelwert ist die Wurzel aus dem Mittel der Quadratwerte. Ein Beispiel wird ihn erläutern und zugleich zeigen, wie groß der bei der üblichen Näherungsrechnung gemachte Fehler wird.

Ein Gefäß habe 140 cm Höhe und sei auf 100 cm Durchmesser gearbeitet; die Messung in 6 Höhenabständen von je 20 cm habe aber die Durchmesser 100, 101, 103, 102, 99, 97 cm ergeben.

Übliches Verfahren: Mittel der Durchmesser 100,33; also mittlere Fläche 7905,8 qcm. Der Inhalt des Gefäßes bei 140 cm Höhe ist 1106,81 l.

Genaues Verfahren: Die Kreisinhalte zu den gemessenen Durchmessern sind 7854,0; 8011,8; 8332,3; 8171,3; 7697,7; 7389,8 qcm; Mittel aus diesen: 7909,5 qcm. Der Inhalt des Gefäßes bei 140 cm Höhe ist 1107,33 l.

Verfahren mit quadratischem Mittelwert, ebenfalls genau: Die Quadratzahlen der gemessenen Durchmesserwerte sind 10 000, 10 201, 10 609, 10 404, 9801, 9409; deren Mittelwert ist 10 070,7. Der quadratische Mittelwert der Durchmesser ist $\sqrt{10\,070{,}7} = 100{,}35$ cm. Hiermit findet man die mittlere Fläche zu 7909,5 qcm, den Inhalt des Gefäßes zu 1107,33 l, wie beim vorigen Verfahren.

Von den beiden genauen Verfahren ist das erste bequemer, wenn man eine Tabelle der Kreisinhalte zur Hand hat, sonst das zweite. Beide haben also ihre Berechtigung. Übrigens sieht man aber, daß das übliche Näherungsverfahren einen um nur 5,2 l = 0,045% zu kleinen Wert liefert, trotzdem die einzelnen gemessenen Durchmesser bis zu 3% nach oben und unten von ihrem Mittelwert abwichen. Das Näherungsverfahren ist viel bequemer und meist genügend genau, solange die gemessenen Abweichungen klein sind. Bei größeren Abweichungen muß man die genauen Verfahren anwenden.

Den Grund dafür, daß das eben besprochene Näherungsverfahren nur angenähert ist, erkennen wir in der Tatsache, daß die gemessene Größe — der Durchmesser — und die zu berechnende — der Kreisinhalt oder der Inhalt des Gefäßes — nicht linear voneinander abhängen. Der Gefäßinhalt ist vom Quadrat des Durchmessers abhängig: die Beziehung zwischen beiden wird durch eine Parabel, nicht durch eine Gerade, dargestellt. Nur innerhalb enger Grenzen können wir die Parabel durch eine Gerade ersetzen.

Wo nichtlineare Beziehungen vorkommen, darf man nur dann mit einfachen Mittelwerten rechnen, wenn die Abweichungen der gemessenen Größen voneinander nicht allzugroß werden. Bei der Messung von

Wassermengen durch Ausflußöffnungen (§ 51) und in anderen Fällen ist hierauf zu achten. Da bei dieser Messung die gesuchte Wassermenge proportional der Wurzel aus der abgelesenen Standhöhe ist, so könnte man mit einem *Wurzelmittelwert*, einem Analogon zum quadratischen, rechnen. Auch sind *kubische, logarithmische usw. Mittelwerte* denkbar.

Zu beachten ist auch, daß da, wo eine Größe linear von einer anderen abhängt, der *reziproke Wert* nicht linear, sondern nach einer hyperbolischen Funktion von ihr abhängt. Man habe den Gasverbrauch eines Gasmotors gemessen

bei 15,2 PS zu 9,1 cbm/st, entsprechend $9{,}1 : 15{,}2 = 0{,}599$ cbm/PS · st,
bei 24,8 PS zu 12,1 cbm/st, entsprechend $12{,}1 : 24{,}8 = 0{,}488$ cbm/PS · st.

Der Gasverbrauch selbst hängt nun erfahrungsgemäß leidlich linear von der Leistung ab, also kann man (zur Not) interpolieren:

zu 20 PS gehört 10,6 cbm/st und $10{,}6 : 20 = 0{,}530$ cbm/PS · st.

Die direkte Interpolation des spezifischen Gasverbrauches hätte 0,544 cbm/PS · st ergeben — erheblich falsch, weil der spezifische Gasverbrauch durchaus nicht linear von der Leistung abhängt.

Wo eine Größe a als Produkt von zwei anderen gefunden wird: $a = b \cdot c$, bildet man ebenfalls oft den Mittelwert aller b, den wir mit $M(b)$ bezeichnen wollen; man bildet ebenso $M(c)$ und glaubt durch Multiplizieren beider den Mittelwert von a zu finden: $M(a) = M(b) \cdot M(c)$. So verfährt man, wenn man die mittlere elektrische Leistung während längerer Zeit aus den Ablesungen von Spannung und Stromstärke findet (S. 236); um Dividieren handelt es sich beim Auswerten von Indikatordiagrammen (S. 278). Mathematisch ist der *Mittelwert der Produkte* nicht gleich dem Produkt der Mittelwerte, es ist $M(b \cdot c) \gtrless M(b) \cdot M(c)$. Auch hier ist das übliche Verfahren ein brauchbares Näherungsverfahren nur so lange, wie die abgelesenen Einzelwerte nicht zu sehr voneinander abweichen; 10% Abweichung der Ablesungswerte voneinander, d. h. $\pm$ 5% vom Mittelwert, ist auch hier oft die zulässige Grenze, die mindestens von einem der beiden Faktoren b oder c innegehalten werden muß.

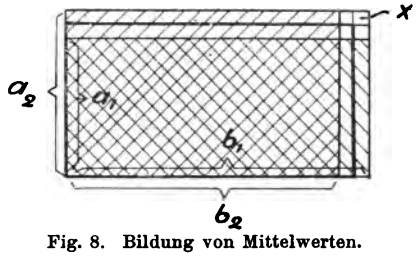


Fig. 8. Bildung von Mittelwerten.

Man erkennt den Fehler, den man durch die einfachere Rechnungsweise begeht, aus Fig. 8. Der Inhalt der beiden schraffierten Rechtecke ist $a_1 \cdot b_1$ und $a_2 \cdot b_2$. Das Mittel aus beiden finden wir, indem wir die starken Geraden mitten zwischen die anderen legen; der Inhalt des stark umfahrenen Rechtecks ist aber nicht genau der Mittelwert aus den beiden anderen: wir haben die kleine Fläche x vernachlässigt.

16. Verallgemeinerung: Beharrungszustand der Maschinen. Was für einzelne Ablesungen richtig ist, gilt ebenso für ganze Versuchsreihen. Man liest an einer Maschine während längerer Zeit die ver-

schiedensten Größen ab, bildet die Mittelwerte und nimmt an, daß man auf diese Weise zueinander passende Angaben erhält. Richtig ist diese Annahme nur, wenn alle gemessenen Größen in linearer Beziehung zueinander stehen; genügend genaue Resultate erhält man, wenn jede der gemessenen Größen nur wenig geschwankt hat, so daß man in diesen engen Grenzen linearen Verlauf annehmen kann.

Bei Dauerversuchen muß also die Maschine annähernd im Beharrungszustande sein. Ist das nicht zu erreichen (Abkühlungsversuche bei Kälteanlagen, S. 334), so kann man unter Umständen durch Abkürzen der Versuchsdauer die Ergebnisse verbessern, weil man den Beharrungszustand besser annähert; oder man muß feststellen, wie die sich ändernde Größe von den übrigen abhängt, und innerhalb welcher Grenzen man diese Abhängigkeit als linear ansehen kann.

17. Genauigkeit der Zahlenangaben. Die Genauigkeit einer Zahlenangabe ist nach der Anzahl der gültigen Ziffern zu bewerten, nicht nach der Stellung der Stellen zum Komma. Gibt man die Länge einer Brücke zu 1832 m an, beschränkt also die Angabe auf volle Meter, während man den Durchmesser einer Stange zu 18,3 mm, also auf Bruchteile von Millimetern, gemessen hat, so ist nicht die letztere, sondern die erstere Angabe die genauere; denn sie gibt vier Stellen an, der Stangendurchmesser ist nur auf drei Stellen gegeben. Wenn man einen Zylinderdurchmesser zu 183 mm angibt, so ist diese Angabe ebenso genau wie jener Stangendurchmesser von 18,3 mm.

Wo eine Zahlenangabe bis zu einer gewissen Stelle hin gemacht ist, darf man annehmen, daß die letzte angegebene Stelle noch einige Zuverlässigkeit besitzt. Die Angabe der Brückenlänge zu 1832 m wird man nur machen, wenn man so genau maß, daß man den richtigen Wert zwischen 1831,5 und 1832,5 zu vermuten Anlaß hat. Wo man die Brückenlänge nur durch Abschreiten ermittelte, wird man höchstens 1830 schreiben dürfen — das heißt dann, man vermutet den wahren Wert zwischen 1825 und 1835 —, trotzdem man vielleicht 1832 Schritte von je 1 m Länge machte und dann noch 0,1 m übrig behielt, so daß das eigentliche Meßergebnis 1832,1 m wäre; man soll aber an der Genauigkeit der Meßmethoden Kritik üben, in diesem Fall sagen, daß man den Meterschritt bei noch so großer Übung nicht mit größerer Genauigkeit als 1% innehalten kann. Eine bloße Schätzung der Brükkenlänge mit dem Auge wird man als solche kennzeichnen, indem man nur 1800 m hinschreibt. Man sagt damit ohne weiteres aus, daß man für den richtigen Wert einen Spielraum von 1750 bis 1850 m offen lassen will, daß man sich also wohl um etwa 50 m aufwärts oder abwärts könne verschätzt haben. — Ähnlich gibt man den Durchmesser einer Stange zu 18 mm an, wenn man mit dem Taster flüchtig oder unter erschwerenden Umständen gemessen hat; man schreibt 18,3 mm bei Messung mit einer Schublehre, und man darf 18,32 mm schreiben, wenn man eine Schraublehre verwendete — und wenn die Stange gut kreisrund ist.

Diese Bewertung der Genauigkeit des Ergebnisses ist konsequent auch da durchzuführen, wo die letzten Stellen Nullen sind: ein Stab

hat 18,00 mm Durchmesser bei Benutzung einer Schraublehre, bei Benutzung einer Schublehre muß man 18,0 mm schreiben, und 18 mm deutet eine rohe Messung an, wo der wahre Wert zwischen den Grenzen 17,5 und 18,5 mm liegen mag.

Schwierig ist die Beantwortung der Frage, wie genau Ablesungen zu machen sind, welche *Stellenzahl bei den Ablesungen und Rechnungen* zu verwenden ist, und wie weit man Korrektionen ausführen solle. Bei den umfangreichen Zahlenrechnungen, die bei technischen Versuchen vorkommen, vermeidet man gerne unnützen Ballast, während es andererseits unrecht wäre, eine Genauigkeit nicht zu erreichen, die leicht erreichbar ist, wie bei der Umlaufmessung des § 15.

Man muß zunächst über die erreichbare oder erforderliche *Genauigkeit des Gesamtergebnisses* klar sein. Bei vielen Versuchen haben Zufälligkeiten, wie Schmierung der Lager und der Zustand der Stopfbüchsen, erheblichen Einfluß auf das Endergebnis; in anderen Fällen handelt es sich um Feststellung von Größen, die gar nicht in beliebig großer Genauigkeit feststellbar sind, weil sie gar nicht so genau in der Natur vorhanden sind; so geht es mit den Durchmessern runder geschmiedeter Behälter oder selbst gedrehter Zylinder, die merkliche Abweichungen von der Kreisform haben, und andererseits an verschiedenen Stellen der Länge verschiedene Werte haben und mit der Art der Aufstellung sich ändern, so daß es ganz unmöglich ist, „den Durchmesser" auf Bruchteile von Millimetern zu messen. Ähnliches gilt bei der Untersuchung der Eigenschaften von Materialien, die von Stelle zu Stelle Verschiedenheiten aufzuweisen pflegen. Es hat keinen Zweck, die Genauigkeit der Ergebnisse weit über die Grenze hinaus zu treiben, wo diese Zufälligkeiten sich bemerkbar machen.

Im allgemeinen wird man es bei technischen Untersuchungen als sehr befriedigend ansehen, wenn die Genauigkeit der Ergebnisse — für die wir in § 18 ein Merkmal kennen lernen werden — etwa $\pm 1\%$ beträgt, das heißt, wenn die Ergebnisse im allgemeinen um nicht mehr als 1% vom wahren Wert der betreffenden Größe abweichen. Bei den meisten Untersuchungen, insbesondere wenn sie nicht im Laboratorium, sondern im praktischen Betriebe gewonnen sind, bleibt die Genauigkeit weit hinter diesem Wert zurück, und eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ wird oft genügen müssen. Dieser Genauigkeitsgrad von $\pm 5\%$ ist insofern als zu erstreben und als ausreichend festgelegt, als der Verein Deutscher Ingenieure in den Normen für Abnahmeversuche, die er für verschiedene Maschinenarten festgesetzt hat, mehrfach bestimmt, eine Garantie solle noch als erfüllt gelten, wenn die durch den Versuch ermittelte Zahl um nicht mehr als 5% ungünstiger ist als die zugesicherte Zahl. Wo also ein Wirkungsgrad von 70% garantiert ist, da muß der Versuch mindestens $0{,}95 \cdot 70 = 66{,}5\%$ Wirkungsgrad haben errechnen lassen. Dieser Bestimmung liegt der Gedanke zugrunde, daß bei 66,5% errechneter Zahl der Fehlbetrag sehr wohl in der Ungenauigkeit der Versuche und nicht in der Maschine seine Ursache haben könne. In denjenigen Versuchsregeln des Vereines, die in den letzten Jahren erschienen sind, ist man von Gewährung dieses Spielraumes von 5% teilweise wieder abgekommen.

Dies bezog sich auf die Genauigkeit des Endergebnisses einer Untersuchung, das sich oft auf zahlreiche Einzelablesungen aufbaut. Es wäre aber falsch, alle Ablesungen bei einem Verdampfungsversuch am Dampfkessel nur bis auf 5% genau, also nur zweistellig zu machen, weil man weiß, daß das Endergebnis doch um 5% unsicher bleiben wird. Um vielmehr diese Genauigkeit im Endergebnis zu erzielen, muß man die ersten Ablesungen genauer machen. Sonst kommt ein Prozent zum andern, wie man zu sagen pflegt.

Man wird deshalb im allgemeinen die einzelnen Ablesungen so genau machen, wie es sich eben machen läßt, ohne allzu großen Zeitaufwand. Es wird aber gut sein, zu überlegen, wie groß der Einfluß ist, den der zu erwartende Fehler jeder einzelnen der Ablesungen auf das Gesamtergebnis ausübt. Man wird dann die größte Sorgfalt auf die Ablesung derjenigen Größen legen müssen, die das Gesamtergebnis am meisten beeinflussen. Man wird es als erstrebenswert ansehen, die verschiedenen Einzelgrößen mit je solcher Genauigkeit abzulesen, daß die verschiedenen zu erwartenden Fehler des Gesamtresultat etwa gleich stark beeinflussen. Das ist natürlich nicht so gemeint, daß man jede der Einzelablesungen nur nach Maßgabe der ungenauesten unter ihnen vornehmen solle, sondern umgekehrt, daß man die ungenaueste verbessern und auf das Niveau der andern heraufschrauben solle. Es wäre falsch, beim Dampfverbrauchsversuch an einer Dampfmaschine für die Wassermessungen ebenso große Ungenauigkeiten zuzulassen, wie man beim Indizieren, wegen der Mangelhaftigkeit des Indikators, leider zulassen muß; aber man soll den Indikator in besten Zustand setzen.

Das Beispiel des § 14 von der Messung der Umlaufzahl erläuterte schon die Tatsache, daß beim Ziehen von Ergebnissen, die mehrere Beobachtungen erfordern, die Genauigkeit des Ergebnisses durch die Genauigkeit der mindestgenauen Ablesung beschränkt ist. Diese zu verbessern, muß daher die Aufgabe sein, wenn man ein genaueres Endergebnis haben will.

Nicht immer liegen die Verhältnisse so einfach wie in jenem Fall der Umlaufmessung, wo beide Größen einen Quotienten miteinander bilden. Überall, wo eine relativ kleine Größe zu einer viel größeren arithmetisch hinzutritt, das heißt zu addieren oder zu subtrahieren ist, da kann man sich bei der kleineren mit viel geringerer Genauigkeit begnügen. Es genügt dann nämlich, beide bis zur gleichen Stellenzahl vom Komma an gerechnet zu haben. Insbesondere die *Genauigkeit von Korrektionen* braucht daher nur eine mäßige zu sein. Zeigt ein Quecksilbermanometer bei 18° C den Stand von 467 mm (höchstens auf volle Millimeter ablesbar wegen der Schwankungen des Maschinenganges) und wollte man diese Ablesung auf 0° C Normaltemperatur des Fadens reduzieren (S. 56), so kann man leicht mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten 0,000 180 des Quecksilbers eine Korrektion von minus $18 \cdot 0{,}000\,180 \cdot 467 = 1{,}512$ mm errechnen; es wäre aber falsch, das Ergebnis nun $467 - 1{,}512 = 465{,}488$ mm zu schreiben; die Genauigkeit ist, wegen der Ablesung, auf volle Millimeter beschränkt, und das Ergebnis ist 465 mm zu schreiben.

Wo man den Elastizitätsmodul E des Materials aus der Längenänderung λ eines Stabes von der Länge l und dem Querschnitt $\frac{1}{4} D^2\pi$ bei einer Last P ermitteln will mittels der bekannten Formel

$$E = \frac{P \cdot l}{\frac{1}{4} D^2\pi \cdot \lambda},$$

da wird man besonderen Wert legen müssen auf die Messung von D, weil diese Größe im Quadrat ins Endergebnis eingeht, ein Fehler in D also das Endergebnis doppelt so stark beeinflußt wie eine gleich große Ungenauigkeit in einer der übrigen Größen. Außerdem wird man λ besonders sorgfältig ermitteln müssen, weil es eine sehr kleine Größe ist, die entsprechend schwierig zu messen ist.

Wenn man bei der Ermittlung des Wirkungsgrades eines Dampfkessels auch Druck und Temperatur des erzeugten Dampfes mißt, so darf man ruhig diese Messungen mit geringerer Sorgfalt ausführen als die Messung der Kohle- und der Wassermenge. Weiß man doch, daß der Wärmeinhalt des Dampfes nur verhältnismäßig wenig mit steigender Temperatur zunimmt, und daß der Dampfdruck fast gar keinen Einfluß auf ihn hat. Eine Messung der Temperatur in vollen Graden, wo nicht gar mit einem in je 5° geteilten Thermometer, und eine Messung des Druckes auf Zehntel oder halbe Atmosphären werden also oft ausreichend sein. Da indessen der Dampfverbrauch einer Maschine merklich vom Betriebsdruck abhängt, so hat man größere Sorgfalt auf die Druckmessung zu verwenden, wenn der Verbrauch einer Maschine zu messen ist.

Besondere Genauigkeit muß man anstreben, wo die gesuchte Größe als Differenz zweier wenig von einander verschiedener Zahlen gefunden werden soll, also bei *Differenzmethoden*. So ermittelt man die Reibungsverluste einer Dampfmaschine als Differenz aus indizierter Leistung N_i und gebremster N_e. Ist $N_i = 100$ PS und $N_e = 90$ PS, so ist der Reibungsverlust 10 PS. Hat man N_i und N_e auf etwa 1% genau ermittelt, sind aber zufällig die Fehler nach entgegengesetzter Richtung gefallen, so werden wir $N_i = 101$ PS und $N_e = 89$ PS statt der wahren Werte gefunden haben. Daraus entnehmen wir den Reibungsverlust $101 - 89 = 12$ PS, also um 20% falsch. Aus den kleinen Fehlern ist ein verhältnismäßig viel größerer geworden.

Gegen das Mitschleppen zu vieler Stellen sprechen noch *Unsicherheiten in den physikalischen Grundlagen*: Die Angaben für das mechanische Wärmeäquivalent schwanken zwischen 424 und 430 m · kg für die Wärmeeinheit, also um $1^1/_4$%. Obgleich 427 heute als wahrscheinlicher Wert gilt, rechnet man noch gelegentlich mit 424, einem älteren Wert, für den die Tabellen einmal aufgestellt sind. Die Ergebnisse werden um 1% falsch. — Die spezifische Wärme überhitzten Wasserdampfes ist von der Temperatur und vom Druck stark abhängig; man rechnet gelegentlich noch mit konstanten Werten, meist mit $c_p = 0{,}48$ oder $c_p = 0{,}5$. Nachdem nun bessere Werte bekannt sind, sollte man sich ihrer bedienen, sonst darf man jedenfalls die Ergebnisse der Untersuchung nicht auf sehr viele Stellen angeben. — Die spezifische Wärme der Gase nimmt man oft als konstant an, doch ist sie zweifellos von

der Temperatur stark abhängig. Die Frage nach der Veränderlichkeit der spezifischen Wärme der Gase bei höheren Temperaturen und höheren Drucken ist aber quantitativ noch nicht sicher beantwortet. — Endlich ist auf die Unsicherheit hinzuweisen, in der man sich über die spezifische Wärme des Wassers befindet und damit über die Größe der Wärmeeinheit. Wir verweisen deshalb auf § 104.

Wie man sieht, liegen die Unsicherheiten der Rechnung hauptsächlich in den Wärmewerten. Bei rein mechanischen Vorgängen pflegen die Meßmethoden — namentlich Wasser- und Luftmessung bei größeren Mengen, Bremsung, Indizierung — Ungenauigkeiten von ähnlichen Beträgen in die Rechnung zu bringen.

18. Darstellung von Ergebnissen; Fehlermaßstab. Das Ziel irgendwelcher Messungen kann ein zweifach verschiedenes sein.

Im ersten Fall will man das Verhalten des untersuchten Gegenstandes, sagen wir einer Maschine, bei einem bestimmten Zustande feststellen. Das ist der Fall, wenn man den Dampfverbrauch einer Dampfmaschine bei einer bestimmten vorgeschriebenen Belastung nachprüft, etwa ob er den Garantiebedingungen entspricht. Ein Einzelversuch führt hier nur zu unsicherem Resultat: man macht deshalb mehrere Versuche, ohne etwas an den äußeren Bedingungen zu ändern, und nimmt den *Mittelwert*. Daran, wie weit die Einzelversuche vom Mittel abweichen, hat man einen Maßstab für die Genauigkeit des Resultats. Die Mathematik weist bei der Lehre von der Methode der kleinsten Quadrate nach, daß man nicht die Abweichungen der Einzelergebnisse vom wahren Wert, sondern die Quadrate dieser Abweichungen als Maß des Fehlers heranziehen müsse, um nicht auf innere Widersprüche zu kommen; daraus folgt dann, einerseits, daß man als wahrscheinlichsten Wert einer mehrfach gemessenen Größe denjenigen anzusehen habe, für den die Summe der Quadrate der Abweichungen möglichst klein ist — daher der Name der Rechnungsart — und daß der einfache Mittelwert dieser Forderung genügt; andererseits folgt daraus, daß man als *mittleren Fehler*[1]) den quadratischen Mittelwert (S. 24) aus den Abweichungen anzusehen habe, das heißt also die Größe $f_m = \sqrt{\frac{\Sigma f^2}{m}}$; hierin soll f die Größe der einzelnen Abweichungen vom Mittelwert (genauer gesagt vom wahren Wert, zu dem der Mittelwert nur eine Annäherung ist) sein, und m die Anzahl der Ablesungen. Haben wir etwa für den stündlichen Dampfverbrauch einer Maschine bei einer bestimmten Belastung von 200 KW nacheinander folgende Werte gemessen:

1831; 1842; 1828; 1810; 1840 kg,

so können wir folgende Rechnung machen: Der Mittelwert ist 1830,2 kg; die Abweichungen vom Mittelwert sind:

$f = +0{,}8;\quad +11{,}8;\quad -2{,}2;\quad -20{,}2;\quad +9{,}8,$

und deren Quadrate sind:

$f^2 = 0{,}64;\quad 139{,}24;\quad 4{,}84;\quad 408{,}04;\quad 96{,}04.$

[1]) Der mittlere Fehler ist nicht dasselbe wie der wahrscheinliche. Der wahrscheinliche Fehler ist das 0,674fache des mittleren.

Also wird $\Sigma f^2 = 648{,}80$, und man kann sich leicht davon überzeugen, daß dieser Wert größer wird, wenn man statt des arithmetischen Mittels 1830,2 kg einen größeren oder einen kleineren Wert als wahrscheinlichsten Wert des Dampfverbrauches hätte einführen wollen. Der mittlere Fehler unserer Versuchsreihe ist $f_m = \sqrt{\frac{648{,}80}{5}} = \pm 11{,}4$ kg. Man gibt den Fehler gern in Prozenten oder Bruchteilen des Absolutwertes; er ist dann $f_m = \pm \frac{11{,}4 \cdot 100}{1830{,}2} = \pm 0{,}62\%$. — Diese wenig zeitraubende Rechnung zu machen ist jedenfalls besser, als wenn man einfach den Unterschied zwischen Höchst- und Mindestablesung als Maßstab für die Meßgenauigkeit ansieht; ist es doch immer mehr oder weniger Zufall, wenn ein Wert (in unserem Fall 1810) besonders weit vom Mittelwert entfernt. Solchen abweichenden Wert aber nur wegen seiner größeren Abweichung unbeachtet zu lassen, ist grundsätzlich falsch; sein Einfluß wird schon genügend beschränkt, weil ein Einzelwert nur schwach auf den Mittelwert einwirkt. *Stark abweichende Werte* dürfen nur aus sachlichen Gründen fortgelassen werden, zum Beispiel, wenn sich nachträglich zeigte, daß die Wage in Unordnung gekommen war, oder daß eine unbeabsichtigte Stromentnahme ungemessen erfolgt war.

Die Fehlerausgleichung und der Fehlermaßstab berücksichtigt nur *zufällige Beobachtungsfehler*; die *systematischen*, in der Versuchsanordnung begründeten bleiben bestehen. Ein systematischer Fehler wäre es etwa gewesen, wenn man bei allen ebengenannten Versuchen vergessen hätte, außer dem im Zylinder arbeitenden Dampf auch den Manteldampf zu messen, oder wenn die Wage falsch austariert gewesen wäre. Die systematischen Fehler sind durch mehrfache Versuchsausführung nicht zu beseitigen. —

Im anderen Fall ist die Aufgabe die, das Verhalten der untersuchten Maschine bei Änderung einer der Versuchsbedingungen zu ermitteln. Dann läßt sich das Versuchsergebnis nicht durch eine Einzelzahl ausdrücken, sondern durch eine Tabelle oder besser durch eine *graphische Darstellung*, ein *Schaubild*. Im Schaubild trägt man als Abszissen wagerecht diejenige Größe ein, die man künstlich geändert hatte, als Ordinate die gesuchte und erhält als Ergebnis jedes Einzelversuches einen Punkt (Fig. 9a und 9b, Tabelle, s. S. 31). Indem man durch diese Punkte einen glatten Kurvenzug hindurchlegt, erhält man als Ergebnis der ganzen Versuchsreihe eben diese Kurve. Dabei werden oft die Punkte unregelmäßig liegen, so daß man eine glatte Kurve nicht durch sie hindurchlegen kann, das würde sonst eine Schlangenlinie geben. Man legt die Kurve so, daß die Punkte möglichst gleichmäßig zu ihren beiden Seiten verteilt sind.

Dieses Verfahren, die Kurve glatt durch die Punkte hindurchzulegen, ist nicht als ein unerlaubtes Mittel zur Verschönerung des Ergebnisses anzusehen. Die unregelmäßige Lage der Punkte rührt meist von den Messungsungenauigkeiten her und hat nicht im Verhalten der

Bremsung eines Elektromotors.

	Elektr. Leistung N_{el}	N_b	$\eta = \frac{N_b}{N_{el}}$	$N_{el} - N_b$
	KW	KW	—	KW
a	1,1	Leerlauf	0	1,1
b	3,0	1,9	0,63	1,1
c	6,0	4,7	0,78	1,3
d	9,0	7,4	0,82	1,6
e	12,0	9,8	0,81	2,2

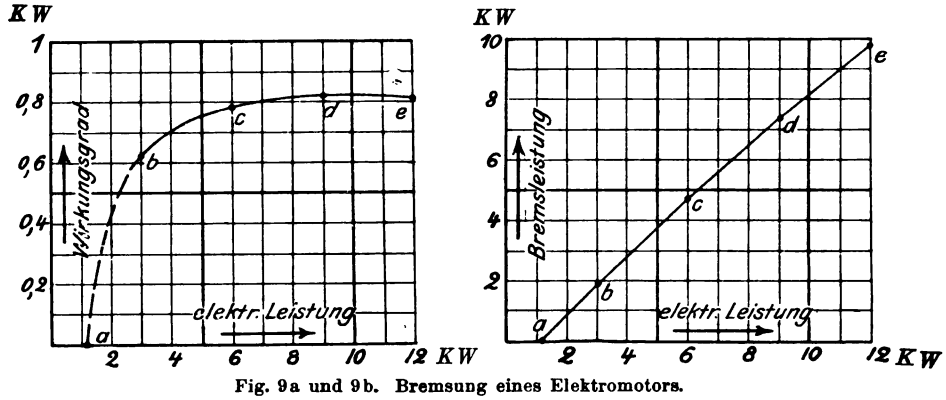


Fig. 9a und 9b. Bremsung eines Elektromotors.

Maschine seine Begründung. Zieht man die Kurve glatt hindurch, so merzt man die zufälligen Fehler aus und erhält die nach den Versuchen wahrscheinlichste Darstellung des Ergebnisses: man bildet gewissermaßen den Mittelwert.

Wie aber bei Bildung des Mittelwertes aus mehreren Versuchen die Abweichungen der Einzelzahlen vom Mittelwert einen Maßstab für die Genauigkeit liefern, mit der die Versuche ausgeführt wurden, so auch im jetzigen Fall: die glatt hindurchgelegte Kurve ist das wahrscheinlichste Ergebnis der Versuche; je weiter die einzelnen Punkte zu beiden Seiten von der Kurve abliegen, desto geringere Genauigkeit wird man dem einzelnen Versuche und der ganzen Reihe zuschreiben dürfen.

Wenn das Ziehen der Kurve ein Analogen zur Bildung des Mittelwertes ist, so kann man auch als Maßstab der Genauigkeit den mittleren Fehler übernehmen. Wo man zunächst, nach Eintragen der Punkte in ein Netz, im Zweifel ist, ob die eine oder die andere von zwei Kurven den Versuchen besser entspricht — und man ist oft im Zweifel zwischen Kurven verschiedenen Charakters — da kann man für jede der Kurven die Abweichungen der einzelnen Punkte ausmessen und die Quadratsumme der Abweichungen bilden; diejenige Kurve ist die bessere, bei der die Quadratsumme kleiner ausfällt. Und weiterhin kann man den mittleren Fehler der Versuche aus dieser Quadrat-

summe finden, ganz wie beim mehrfach ausgeführten Einzelversuch. — Was die Größe der Abweichungen anlangt, die man auf dem Papier ausmessen muß, so kann man sie entweder ihrer absoluten Größe nach benutzen oder ins Verhältnis zur Länge ihrer Ordinate setzen; man kann das Summenquadrat der Absolutwerte oder der Relativwerte als maßgebend ansehen; was man tut, hängt davon ab, ob man den Einzelversuchen selbst an allen Stellen gleiche absolute oder gleiche relative Genauigkeit zutraut. Auch sonst bleibt manches der Willkür überlassen; so kann man die Abweichungen von der Kurve in Richtung der Ordinate oder aber normal zur Kurve messen; letzteres würde dem Umstande gerecht werden, daß man selten Grund hat, die Ordinate vor der Abszisse zu bevorzugen. Das vorgeschlagene Verfahren ist kein streng mathematisches; es läßt dem Ermessen des Rechnenden den Raum, der zur Berücksichtigung der besonderen Versuchsbedingungen wünschenswert ist. —

Es ist Sache des geschulten Taktgefühls, die Kurve geschickt durch die Punkte hindurchzulegen. Die Versuchsergebnisse werden dadurch wesentlich beeinflußt, wenn man sich bei den kostspieligen technischen Messungen mit einer geringen Zahl von Punkten begnügen muß. Oft kann man die Unsicherheit in dieser Hinsicht vermindern durch *Änderung der dargestellten Größen.*

Beim Aufstellen der Wirkungsgradkurve eines Elektromotors, Fig. 9a, ist man namentlich unsicher über den Verlauf des unteren punktierten Astes. Stellt man aber in Fig. 9b die abgebremste Leistung als Funktion der elektrisch eingeführten dar, so herrscht diese Unsicherheit nicht, weil diese Kurve fast geradlinig verläuft. Und nun kann man aus Fig. 9b noch einige Punkte für den unteren Ast der Wirkungsgradkurve berechnen, die durch Versuch nicht gut festzustellen sind, und hat auch den unteren Ast sicherer.

Noch besser kommt man zum Ziel, wenn man die Unterschiede $N_{el} - N_b$ bildet, das sind die Verluste im Motor; in der letzten Spalte der Tabelle ist das geschehen. Die annähernde Konstanz der Verluste gestattet es auch wieder, zwischen a und b noch einen weiteren Hilfspunkt einzulegen. —

Im allgemeinen wird man bei einer Versuchsreihe wie der eben besprochenen immer nur eine Größe, diesmal die Bremsleistung, willkürlich ändern. Die anderen Bedingungen, Erregung, Spannung, müssen konstant gehalten werden. Wollte man bei einer zweiten Versuchsreihe den Einfluß verschiedener Erregung studieren, so hätte man diesmal die Bremsleistung konstant zu halten und das Resultat in einem anderen Schaubild darzustellen.

Wo *zwei Größen willkürlich verändert* worden sind, kann man die Resultate der Versuche nicht mehr in einer Kurve darstellen, sondern muß das in Form von einer oder mehreren *Kurvenscharen* tun. Ein Beispiel für diese Form der Darstellung ist Fig. 10, die das Verhalten eines Zentrifugalventilators veranschaulicht. In dieser Figur sind als Abszissen die geförderten Luftmengen und als Ordinaten die Drucke aufgetragen, gegen die die Luft zu fördern ist. Eingetragen in das

Schaubild sind drei Kurvenscharen; die eine gibt Kurven gleicher Umlaufzahl, die zweite Kurven gleichen Arbeitsbedarfes während die dritte Schar Kurven gleichen Wirkungsgrades darstellt. Aus dem Schaubild können wir beispielsweise folgendes entnehmen: Soll der betreffende Ventilator in der Sekunde 1 kg Luft (von dem Druck und der Temperatur, wie sie bei den Versuchen herrschten) gegen 400 mm WS Druck fördern, so muß man ihn mit fast 2100 Umläufen in der Minute betreiben — hiernach bestimmt sich die Größe der antreibenden Riemenscheibe; zum Betrieb sind etwas über 6 PS aufzuwenden — hiernach bestimmt sich die Größe des Antriebsmotors oder die Breite des antreibenden Riemens. Zugleich sehen wir, wie der Ventilator unter diesen Verhältnissen einen besonders guten Wirkungsgrad von über

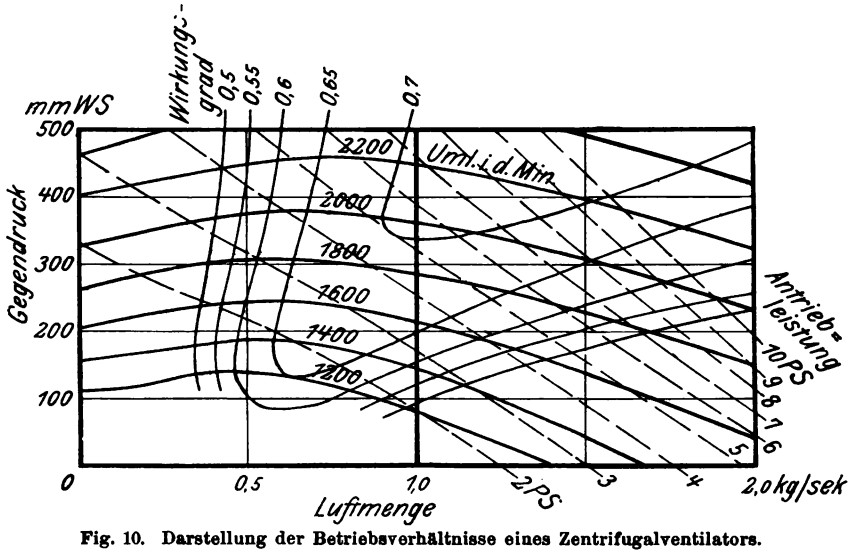


Fig. 10. Darstellung der Betriebsverhältnisse eines Zentrifugalventilators.

70% hat, so daß er für die geforderten Betriebsverhältnisse ganz besonders geeignet ist. Wären nur 0,4 kg/sek gegen die gleichen 400 mm WS zu fördern, so könnte der gleiche Ventilator zwar benutzt werden, er müßte wieder 2100 Uml/min machen und brauchte zum Antrieb 3,5 PS; doch wäre der Wirkungsgrad diesmal unter 50%, wie das auch schon darin liegt, daß der Förderdruck auf $^2/_5$ des früheren, die Antriebsleistung jedoch nur im Verhältnis 6 zu 3,5 gesunken ist. Die im zweiten Fall verlangten Verhältnisse sind also für diesen Ventilator nicht günstig, und man wird besser zu einem anderen — kleineren — Modell greifen.

Noch manches andere kann man aus solchem Schaubild ablesen. So kann der Ventilator, dem man einen Motor mit 6 PS Leistung gegeben hat, und der gegen 400 mm WS 1 kg/sek normal zu fördern hat, zunächst die betreffende Luftkammer mit Druck auffüllen müssen, und das soll in vorgeschriebener Zeit geschehen. Statt eines besonderen

Versuches können wir unser Schaubild zu Hilfe nehmen, um die Aufgabe zu lösen. Wir sehen leicht, daß wir anfangs bei noch geringem Gegendruck auf sehr große Leistungen kommen, wenn wir schon den Motor mit 2100 Uml/min wollten laufen lassen; die Kurve 2100 schneidet, nach rechts verfolgt, Kurven immer größerer Leistung; die Sicherung würde durchbrennen. Soll der Motor nicht überlastet werden, so müssen wir uns auf einer Kurve gleicher Leistung bewegen, das heißt also, die Kurve der 6 PS ist nach rechts zu verfolgen. Man hätte daher die Auffüllung mit 1600 Uml/min zu beginnen, es werden dabei 2,1 kg/sek gefördert; mit steigendem Druck darf man die Umlaufzahl erhöhen, die sekundliche Fördermenge fällt; durch Integrieren der Luftmengen — am einfachsten graphisch — erhielte man die Zeitdauer bis zur Erreichung des vollen Druckes, wenn natürlich die Kammergröße bekannt ist. Man sieht zugleich, bis zu welcher Umlaufzahl der Motor muß herabgeregelt werden können. Ob übrigens der Elektromotor bei der ermäßigten Umlaufzahl die 6 PS hergeben kann, bedürfte besonderer Erörterung.

Wir würden uns vom Thema „Messungen" verlieren, wollten wir dieses Beispiel oder manches andere genauer ausführen. Es soll nur gezeigt werden, wie mannigfache Ergebnisse aus einer verhältnismäßig beschränkten Zahl von Beobachtungen (hierüber sogleich Näheres) mit ausreichender Sicherheit, wenn auch mit mäßiger Genauigkeit, gezogen werden können, wenn sie gründlich verarbeitet sind.

Ein in dieser Form gegebenes Versuchsergebnis veranschaulicht das Verhalten einer Maschine in der übersichtlichsten Weise. Die Frage wäre nur, wie man das Schaubild Fig. 10 erhalten kann. Die Kurvenscharen sind ohne weiteres Kurve für Kurve durch Beobachtung zueinander gehöriger Werte von Druck und Luftmenge aufzunehmen, sofern es gelingt, diejenigen Größen, die im Verlauf einer Kurve konstant sein sollen, auch wirklich konstant zu halten. Man müßte also eine Versuchsreihe ausführen, bei der man der Reihe nach die Umlaufzahl auf 2600, auf 2400, auf 2200 hält und so fort, jede der Kurven durch mehrere Versuche belegend. Dann müßte man eine zweite Versuchsreihe machen, bei der man der Reihe nach die Antriebsleistung auf 10 PS, auf 9 PS hält und so fort, wieder jede Kurve durch eine genügende Zahl von Ablesungen belegend; und das gleiche wäre nun noch für den Wirkungsgrad zu machen.

Solch Verfahren wäre sehr zeitraubend, denn es wäre eine große Anzahl von Versuchen nötig, deren jeder nur zur Feststellung einer Größe ausgenutzt würde; dabei würde noch das Einregeln der Maschine Schwierigkeiten machen: höchstens die Einstellung auf eine bestimmte Umlaufzahl ist manchmal bequem zu machen, die Einstellung auf eine bestimmte Leistung und die Einstellung auf einen bestimmten Wirkungsgrad fast gar nicht, da man ja beide Größen immer erst aus zahlreichen Einzelablesungen berechnet.

Man kann aber wie folgt vorgehen: Man führt die Einzelversuche vollständig beliebig, und nur insofern etwas planmäßig aus, als man dafür sorgt, daß beim Eintragen der verschiedenen Versuche in ein Koor

dinatennetz die Punkte etwa gleichmäßig verteilt werden; dabei mögen vielleicht wieder Luftmenge und Druck als die meist interessierenden Größen den beiden Achsenrichtungen entsprechen (Fig. 11). Nun sollen die Kurven gleicher Umlaufzahl eingetragen werden. Dazu schreiben wir an jeden Punkt die zugehörige Umlaufzahl und legen nun die Kurven so hindurch, wie wir nach den angeschriebenen Zahlen ihren Verlauf erwarten müssen: wir interpolieren die Kurven gleicher Umlaufzahl. Das Verfahren entspricht also der Art und Weise, wie die Kurven gleichen Barometerstandes in den Wetterkarten gefunden werden, die auf Grund der Angaben beliebiger Beobachtungsorte interpoliert werden.

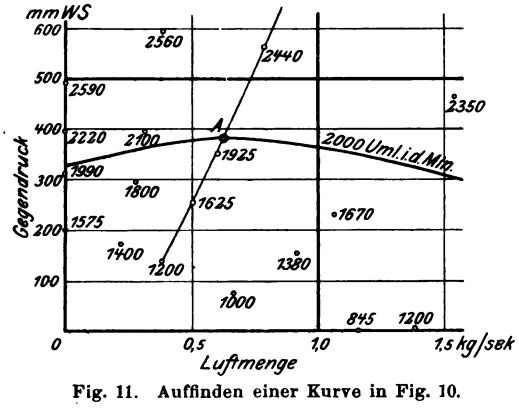


Fig. 11. Auffinden einer Kurve in Fig. 10.

Ziemliche Unsicherheiten werden bei nicht sehr zahlreichen Versuchen leicht bestehen bleiben. Sicherer führt dann folgendes Verfahren zum Ziel. Es waren nämlich bei Ausführung der in Fig. 11 dargestellten Versuche, die an einem elektrisch angetriebenen Ventilator angestellt wurden, die Versuche immer reihenweise ausgeführt worden, wobei nur durch Änderung des Vorschaltwiderstandes die Tourenzahl

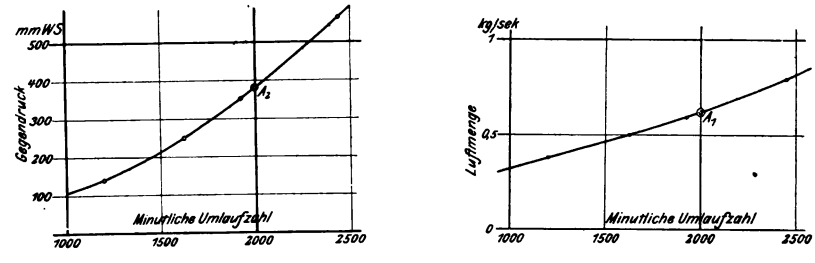


Fig. 12a und 12b. Auffinden einer Kurve in Fig. 10.

geändert worden war, während am Widerstand des Kanals, aus dem die Luft entwich, nichts geändert worden war. So liegen die Punkte immer auf Kurven gleicher äquivalenter Öffnung, deren eine in Fig. 11 auch gezeichnet ist. Infolge dieses planmäßigen Vorgehens ist es möglich, zunächst in zwei Hilfsfiguren sowohl den Druck (Fig. 12a) als auch die Fördermenge (Fig. 12b) je abhängig von der Umlaufzahl für eine bestimmte Öffnung aufzutragen, und in diesen Figuren die Werte für die gewünschte Umlaufzahl als Zwischenwert zu entnehmen; aus den Punkten A_1 und A_2 hat sich der Punkt A der Fig. 11 für die Umlaufzahl 2000 er-

geben. Und später trägt man Druck sowohl wie Fördermenge in zwei Bildern je abhängig von der Leistung auf — Öffnung konstant —, um Zwischenwerte der Leistung entnehmen zu können. So erhält man wesentlich sicherer für das Hauptschaubild Punkte, die gleicher Leistung entsprechen.

Bei dem als Beispiel aufgeführten Ventilator waren, wie schon erwähnt, zwei Größen willkürlich verändert worden — im allgemeinen wohl Umlaufzahl und Druck; die anderen sind damit nach den Eigenschaften des Ventilators festgelegt. Wo mehr als zwei Größen von außer her geändert werden sollen, kann man nicht mehr alles in einem Bild darstellen. So kann man an einer Gasmaschine die Umlaufzahl, die Leistung, den Zündungszeitpunkt und das Mischungsverhältnis unabhängig voneinander ändern, und brauchte daher zur Festlegung des Verhaltens in allen möglichen Zusammenstellungen eine ganze Anzahl von Schaubildern, deren jedes zwei berücksichtigt.

IV. Längenmessung.

19. Einheiten; Druck und Temperatur. Die Länge wird im technischen Maßsystem in Metern gemessen; das Meter ist eine der drei Grundeinheiten dieses Systems. Nach Bedarf verwendet man in der Technik auch Millimeter, Zentimeter und Kilometer als Einheiten, in einigen Sonderfällen wird nach englischen Zollen gerechnet, 1″ engl. = 25,40 mm. Das alles bedarf keiner weiteren Erläuterung.

Das Volumen jedes Körpers ist abhängig von Druck und Temperatur; von diesen beiden Größen hängt also auch die Länge eines festen Körpers ab. Bei Längenmessungen wird man Druck und Temperatur berücksichtigen müssen, wenn es sich um feinere Messungen handelt. Folgende Angaben gewähren einen Anhalt für die Größe ihres Einflusses: Ein Temperaturunterschied von 100° C ändert die Länge von Eisen um 0,11%; er ändert also die wirksame Kolbenfläche einer Dampfmaschine um etwa das Doppelte, 0,22%. Der gleiche Temperaturunterschied ändert die Länge von Messing und Bronze um 0,18 bis 0,19%. Das sind Werte, die man oft nicht vernachlässigen darf. Dagegen ändert sich die Länge bei einer Belastung von 100 kg/qcm erst um $\frac{2}{100}$% bei Schmiedeeisen, um $\frac{1}{100}$% bei Gußeisen. Das ist wenig.

Der Einfluß der Temperatur ist also der bedeutendere. Die Temperatur beeinflußt den zu messenden Gegenstand, aber auch den messenden, der etwa ein einfacher Maßstab sei. Bestehen beide Teile — gemessener und messender — aus demselben Material und haben beide die gleiche Temperatur, so wird jede Messung das gleiche Ergebnis haben, bei welcher Temperatur sie auch ausgeführt sei. Wollte man die Abmessungen des warmen Dampfzylinders mit einem warmen Maß-

stab messen, so wäre dies falsch, die Ablesung wäre der Durchmesser des kalten Zylinders, vorausgesetzt, daß der Maßstab bei 0° C richtig geteilt war, wie üblich. Will man den Durchmesser des warmen Zylinders messen, so muß man dafür sorgen, daß der Maßstab seine Normaltemperatur hat.

Das Meter ist nämlich definiert als Länge des in Paris aufbewahrten Platiniridiumstabes bei 0° C. Diese Einheit ist unabhängig von der Temperatur, und das Meter ist bei 100° C ebenso lang wie bei 0°. Aber die Maßstäbe, mit deren Hilfe wir Messungen ausführen, ändern ihre Länge mit der Temperatur, sie können daher nur bei einer Temperatur richtig sein. Und die gemessenen Gegenstände ändern ihre Dimensionen ebenfalls mit der Temperatur, wir können also ihre Dimensionen nur für eine Temperatur richtig angeben. Für das metrische Maßsystem ist 0° C die vorgeschriebene Normaltemperatur; nur Stäbe, die bei 0° die richtige *Nennlänge* innerhalb gewisser Fehlergrenzen wirklich haben, werden von der Normal-Eichungs-Kommission durch den Eichstempel beglaubigt. Da es sich meist um Stahlmaßstäbe handelt, wo überhaupt genaue Messungen in Rede stehen, so ist dann die *Sollänge* des Stabes bei einer anderen Temperatur um die Ausdehnung des Stahles größer als seine Nennlänge; nur bei 0° stimmen Nenn- und Sollänge überein.

In der herstellenden Maschinentechnik ist es nun meist ausreichend, einfach für gleiche Temperatur des gemessenen Gegenstandes und des Maßstabes zu sorgen. Ist der Gegenstand ganz aus Stahl, so erreicht man dann von selbst, daß er bei 0° die Nennabmessung bekommt, bei der Benutzung entsprechend eine andere; bei anderen Materialien liegen die Verhältnisse weniger einfach. Im ganzen aber kommt es auf ziffernmäßig bestimmte Abmessungen in der herstellenden Technik nicht an, sondern nur darauf, daß die zueinandergehörigen Teile miteinander die richtige Passung erhalten, und darauf, daß die wirklich hergestellte Abmessung auch nach Jahren reproduzierbar ist. Dazu dienen bekanntlich die Systeme der Grenz- und Kaliberlehren und andere Meßmethoden der modernen Werkstattechnik. Nebenbei sei erwähnt, daß diese Maße nicht immer nach der amtlich vorgeschriebenen Normaltemperatur 0° orientiert sind.

Anders liegen die Verhältnisse bei denjenigen Fällen, auf die sich dies Buch bezieht: bei Maschinenuntersuchungen. Hier kommt oft der sonst im Maschinenbau seltene Fall vor, daß man die wirklichen Längenabmessungen bei der gerade vorhandenen Temperatur ziffernmäßig kennen will. So muß man beim Indizieren der Maschinen den Zylinderdurchmesser, beim Benutzen des Bremszaumes die Länge des Hebelarmes ziffernmäßig angeben. In diesem Falle also hat man den Einfluß der Temperatur wohl zu beachten, insbesondere also, daß auch der Maßstab nur bei 0° seine Nennlänge hat, sofern er geeicht ist oder überhaupt sich dem amtlichen metrischen Maßsystem einfügt; sonst hat er seine Nennlänge nur bei seiner Normaltemperatur.

Wenn wir sahen, daß wir den Einfluß verschiedener Spannung meist vernachlässigen können, so haben wir diese Bemerkung dahin richtig-

zustellen, daß jedoch die Pressung eine Rolle spielen kann, mit welcher der messende und der gemessene Körper einander berühren. Von der ersten leisen Berührung beider bis zum vollen Anliegen der Berührungsflächen ist ein gewisser Spielraum gelassen, der bei großer zu messender Länge keine Rolle spielt, bei kurzen Längen aber von Bedeutung sein kann.

20. Längenmeßinstrumente. An Instrumenten zum Messen von Längen sind zu nennen: für rohe Messungen der einfache Maßstab, nötigenfalls unter Zuhilfenahme von Taster und Stichmaßen, und die Schublehre, für feinere die Schraublehre oder Mikrometerschraube und für die feinsten technischen Messungen die Meßmaschine. Von dieser letzteren unterscheiden sich die in der Physik üblichen Instrumente, Komparator und Kathetometer, durch umständlichere Handhabung, die sie für die Benutzung durch weniger geübte Personen ungeeignet macht.

Der einfache *Maßstab* und die *Schublehre* bedürfen keiner Beschreibung. Doch sei darauf aufmerksam gemacht, daß gerade bei den einfachsten Messungen, nämlich außer beim Ausmessen von Längen auch noch beim Wägen, viel gesündigt wird, indem man die käuflichen fabrikmäßig hergestellten Maßstäbe und Gewichte benutzt, ohne sich von ihrer Richtigkeit irgendwie zu überzeugen. Die üblichen Klappmaße sind in den Gelenken oft recht ungenau. Die richtige Ausmessung der Maschinendimensionen ist ebenso wichtig wie die Feststellung des richtigen Federmaßstabes der Indikatoren oder wie die Eichung der Thermometer.

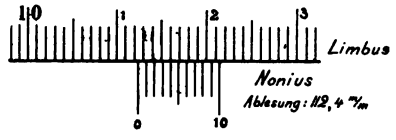


Fig. 13. Ablesung mit Nonius.

Man verwende also zuverlässige Maßstäbe, am besten stählerne, nicht zusammenklappbare. Diese brauchen nur in volle Millimeter geteilt zu sein, man kann dann Zehntel schätzen. Engere Teilung, etwa in halbe Millimeter, erschwert die Ablesung, ohne sie genauer zu machen. Wo man sich nicht auf Schätzung verlassen will, da verwende man nicht einen enger geteilten Maßstab, sondern bediene sich des Nonius. An Schublehren und vielen anderen Instrumenten pflegt ein solcher vorhanden zu sein.

Der *Nonius* ist eine kurze Skala, die vor der Hauptskala, dem Limbus, dahingleitet (Fig. 13). Der Nullstrich des Nonius ist derjenige, dessen Stellung auf dem Limbus man ermitteln will: wir lesen ohne weiteres ab 112 mm und könnten Zehntel schätzen. Statt zu schätzen lesen wir die Zehntel Millimeter am Nonius ab: dieser hat eine Länge von 9 mm, die aber in 10 Teile geteilt sind, so daß jeder Teil $^9/_{10}$ mm lang ist. Wir sehen zu, welcher Teilstrich des Nonius mit einem Teilstrich des Limbus zusammenfällt, und finden, daß der Teilstrich 4 des Nonius mit einem (gleichgültig welchem) Striche des Limbus sich deckt. Also ist $^4/_{10}$ der Bruchteil des Millimeters, den wir noch zu den abgelesenen 112 mm hinzuzuzählen haben: der Nullpunkt des Nonius steht bei

112,4 der Hauptskala, und das ist dann bei einer Schublehre auch der Abstand der Maulhälften. — Der Beweis ist eine einfache Rechenaufgabe.

Dieser Nonius war darauf eingerichtet, daß man Zehntel der Hauptteilung ablesen konnte. Will man Zwanzigstel ablesen, so ist der Nonius 19 mm lang (Fig. 20), dieser Abstand ist in 20 Teile geteilt, jeder Teil ist $^{19}/_{20}$ mm lang. Diesmal finden wir, daß der Strich 8 des Nonius sich mit einem (beliebigen) Strich des Limbus deckt, also sind $^{8}/_{20}$ mm zu der ursprünglichen Ablesung hinzuzufügen, die auch hier wieder 112 war. Daher lesen wir $112\,{}^{8}_{0}$, also wieder 112,4 an der Schublehre ab.

Wir lasen mit dem ersten Nonius auf Zehntel, mit dem zweiten auf Zwanzigstel Millimeter genau ab. Wollten wir den Nonius noch weiter verlängern, um etwa auf Hundertstel Millimeter abzulesen, so wäre das zwecklos: die Teilung einer gewöhnlichen Schublehre ist nicht auf Hundertstel Millimeter genau ausgeführt, also darf man auch die Ablesung nicht so weit treiben. Die Teilstriche sind überdies so dick, daß man schon bei dem Nonius für $^{1}/_{20}$ mm im Zweifel ist, wo Deckung zweier Striche am besten stattfindet.

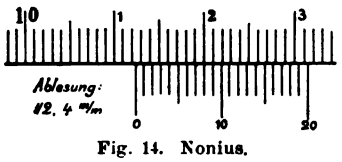


Fig. 14. Nonius.

Für jeden Nonius aber, auch wenn er bei Zollmessungen für Zwölftel oder bei Winkelmessungen für Dreißigstel oder Sechzigstel eingeteilt ist, gilt folgendes: Will man n-tel der Hauptteilung ablesen, so ist der Nonius $n-1$ Teile der Hauptteilung lang, und diese Länge ist in n Teile geteilt. Deckt sich nun der m-te Teilstrich des Nonius mit einem Strich des Limbus, so steht der Nullstrich des Nonius um $\frac{m}{n}$ Teile vom vorhergehenden Strich der Hauptskala ab.

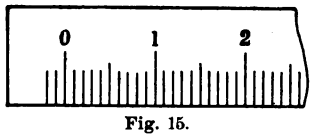


Fig. 15.

Man unterscheidet *End-* und *Strichmaße*. Ein Endmaß hat die Länge, nach der es heißt, zwischen beiden Stirnenden, ein Strichmaß gibt die betreffenden Länge als Abstand zweier Striche, die auf seiner Breitseite aufgerissen sind. Die Klappmaßstäbe geben die Länge 1 m als Endmaß, für jeden anderen Abstand sind sie einerseits End-, andererseits Strichmaß. Endmessungen sind sehr bequem, aber Strichmessungen oft genauer, teils weil Strichmaße nicht wie Endmaße durch Abnutzung sich ändern, teils weil bei ihnen der Maßstab nach beiden Seiten hin ein symmetrisches Bild bietet, was genaues und schnelles Anlegen erleichtert. Deshalb sollten auch die Teilungen reiner Strichmaße, wie der Zeichenmaßstäbe oder Rechenschieber, über den Nullpunkt hinaus um einige Teile fortgesetzt sein, nach Fig. 15, damit sich dem Auge wieder ein symmetrisches Bild bietet. Man benutzt oft beim Zeichnen den 1-cm-Strich als Anfang, weil man so schneller und genauer arbeitet.

Für feinere Messungen dient die *Schraublehre* oder das *Schraubenmikrometer* (Fig. 16a und b). Das zu messende Stück wird zwischen

die Endflächen zweier Schrauben, *a* und *b*, genommen, die durch einen Bügel verbunden sind. Die Schraube *a* ist eine Nachstellvorrichtung. Die Schraube *b* hat genau 1 oder $^1/_2$ mm Ganghöhe und ist der eigentlich messende Teil: jeder Bruchteil einer Umdrehung dieser Schraube ändert den Abstand der Meßflächen um den gleichen Bruchteil eines oder eines halben Millimeters. Man kann also Bruchteile von Millimetern bei *c* am Umfang des Griffes ablesen, mit dessen Hilfe man die Schraube dreht, die vollen Millimeter gibt eine Skala *d* am festen Bügel.

Vor Benutzung hat man sich davon zu überzeugen, daß die Ablesung richtig 0,0 (bei Fig. 16a) wird, wenn man die Schrauben *a* und *b* ganz gegeneinander schraubt, sonst ist Schraube *a* nachzustellen. Bei der Messung selbst muß dann die Meßschraube ebenso stark angezogen werden wie bei dieser Justierung. Das wird bei manchen Schraublehren durch besondere Vorrichtungen (Friktionsanstellung, Fig. 16b oben) erreicht, die bei jeder Messung denselben Druck erreichen läßt.

Da lange Schrauben nicht gleichmäßig herzustellen sind, so hat man nicht eine Schraublehre für alle Abmessungen, sondern mehrere für jedesmal kleinere Meßbereiche, etwa je eine von 0 bis 25, von 25 bis 50, von 50 bis 75 mm. Die letzteren lassen sich zum Justieren nicht ganz zusammenschrauben, sondern man hat dazu eine Kontrollscheibe (Fig. 16b) von genau 25 oder genau 50 mm Durchmesser, nach der man die Einstellung der Nachstellschraube berichtigt.

Mikrometerschrauben ohne den Bügel werden auch geliefert und gestatten, an irgendeinen Maschinenteil befestigt, die Bewegung des letzteren genau zu verfolgen, z. B. beim Auskurbeln von Maschinenventilen.

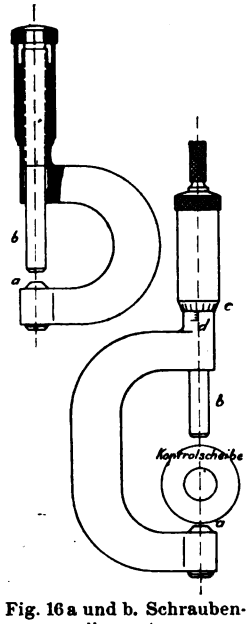


Fig. 16a und b. Schraubenmikrometer.

Noch feinere Längenbestimmungen führt man mit der *Meßmaschine* aus. Diejenige von Reinecker mißt auf $^1/_{10000}$ mm genau, wobei allerdings aufs sorgfältigste auf Temperatur und Anpressung der Fühlflächen geachtet werden muß. Die Meßmaschine sowohl wie Stichmaße, Kaliberbolzen und -ringe und Grenzlehren gehören mehr zu den in der Werkstatt benutzten Geräten; ihre Besprechung fällt daher aus dem Rahmen dieses Buches hinaus. Vgl. auch die früheren Auflagen desselben.

V. Flächenmessung.

21. Planimeter. Der Inhalt einer Fläche — der ja bekanntlich in Quadratzentimeter, Quadratmeter, auch in Quadratfuß oder -zoll angegeben wird — kann aus den linearen Abmessungen durch einfaches Ausmultiplizieren oder mit Hilfe der Simpsonschen Regel oder anderer

mathematischer Formeln gefunden werden. Im folgenden sollen indessen Planimeter besprochen werden, das sind Meßinstrumente, die die Größe der Fläche durch mechanisches Umfahren ihrer Umrisse zu ermitteln gestatten.

Das von Amsler angegebene *Polarplanimeter* ist in Fig. 17 schematisch dargestellt. Zwei Stäbe MF und PG sind im Gelenk G miteinander verbunden. Der Pol P ist eine Spitze, die man fest ins Papier setzt und durch ein Gewicht beschwert; mit dem Fahrstift F, ebenfalls einer Spitze, umfährt man die auszumessende Figur von einem beliebigen Punkt des Umfangs bis zu genau demselben Punkt, den man zweckmäßig vorher durch Einstechen markiert; dann läuft das Meßrädchen M auf dem Papier, auf dem es ebenfalls aufliegt, und zwar ist die abgewickelte Länge, wie die Theorie zeigen wird, proportional der Fläche, die wir umfahren hatten. Wir können also den Umfang des Meßrädchens direkt in Quadratzentimeter Fläche einteilen.

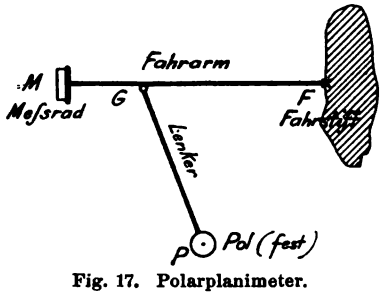


Fig. 17. Polarplanimeter.

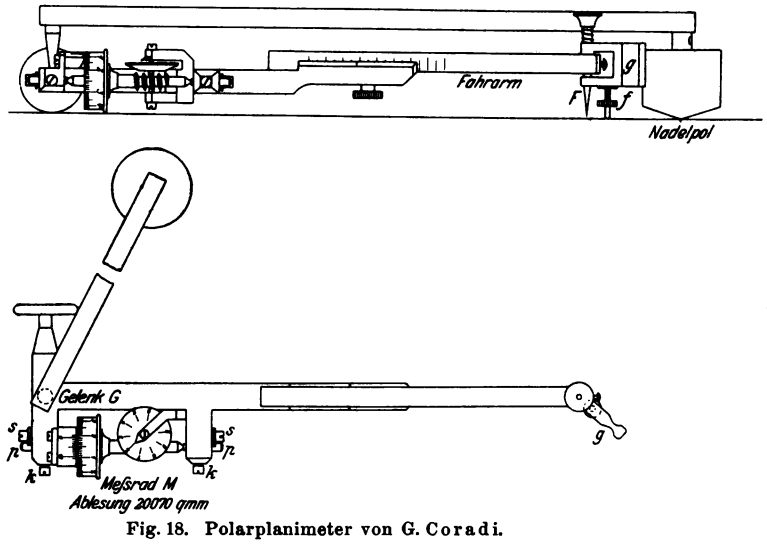


Fig. 18. Polarplanimeter von G. Coradi.

Die Bauart eines Planimeters geht aus Fig. 18 im einzelnen hervor. Der Pol wird mit einer kleinen Nadel ins Papier gespießt (bei anderen Konstruktionen nur flach hingelegt), der fest an ihn geschraubte Lenker fällt lose in eine Bohrung des Fahrarms und bildet dort ein Kugelgelenk. Der Fahrarm steht mit Fahrstift F und Meßrad M und noch mit einer Laufrolle, also in drei Punkten, auf dem Papier und wird von dem

Lenker nur gelenkt. Zum Führen des Fahrstiftes ist ein Handgriff g vorhanden, ein unten abgerundeter Tragfuß f verhütet, daß der Fahrstift das Papier ganz berührt und zerkratzt; nur zum Kennzeichnen des Anfangspunktes der Umfahrung kann man durch Niederdrücken des Fahrstiftes entgegen der Kraft einer Feder einen Stich ins Papier machen, in den man am Schluß der Umfahrung wieder hineingeht. Die Ablesung erfolgt am Umfang des Meßrades mittels Nonius, die vollen Umdrehungen des Meßrades werden durch eine Zehnerscheibe registriert.

Die einfachste *Theorie des Planimeters* ist die von Kirsch, die wir im folgenden wiedergeben.

Der wirksame Teil des Planimeters ist das Meßrädchen, dessen Drehung wir ablesen. Wenn wir ein solches Meßrädchen, Fig. 19, in Richtung des Pfeils *1*, also in Richtung der Achse, bewegen, so wird es sich offenbar gar nicht drehen, es gleitet; wenn wir es — immer natürlich mit seinem Umfang auf der Papierebene aufliegend — in Richtung des Pfeils *2*, senkrecht zur Achse bewegen, so wird einfach Rollen stattfinden und die zurückgelegte Strecke vollständig durch Ablesen des Rades festzustellen sein. Von jeder anderen Bewegung wird die Komponente in Richtung des Pfeils *2* vom Meßrad registriert. — Wenn wir nun an einem Lineal eine Reihe von Meßrädchen in einer Ebene liegend, also mit einander parallelen Achsen, so anbringen, daß alle das Papier berühren (Fig. 20), so drehen sich alle diese Rädchen übereinstimmend um denselben Winkel, ganz gleichgültig, wie man das Lineal bewegt. Die Bewegung des Lineals aus der Lage $A\,B$ (Fig. 21) in die Lage $A'B'$ kann man nämlich betrachten als zusammengesetzt aus einer Drehung um C als Mittelpunkt nach $A''B''$ — diese Drehung beeinflußt die Rädchen gar nicht — und aus einer Verschiebung des Lineals auf C zu —, diese Verschiebung beeinflußt alle Rädchen gleichmäßig. Jede irgendwie gestaltete Bewegung des Lineals kann man aber als Aufeinanderfolge von unendlich kleinen Drehungen und Verschiebungen auffassen.

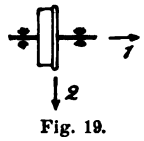


Fig. 19.

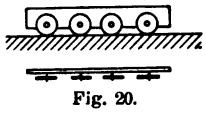


Fig. 20.

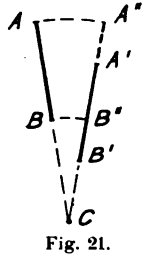


Fig. 21.

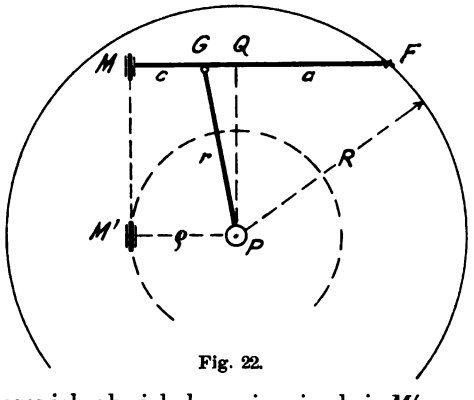


Fig. 22.

Wenn wir in Fig. 22 ein Planimeter haben und dessen Fahrstift F im Kreise um den Pol P herumführen, so wird sich das Meßrädchen M ebensoviel abwickeln, wie ein bei M' gedachtes es täte, dessen Lagerung mit $M\,F$ starr verbunden wäre.

Daraus folgt zunächst, daß das Meßrädchen sich überhaupt nicht

abwickelt, wenn wir F auf einem Kreise von solcher Größe herumführen, wie Fig. 23 es andeutet. Hier geht nämlich die Ebene des Meßrädchens M durch den Pol P. Den als *Nullkreis* bezeichneten Kreis vom Radius R_0 kann man also mit dem Fahrstift umfahren, ohne daß das Meßrädchen sich abwickelt. Der Radius des Nullkreises ist, nach dem Pythagoras,

$$R_0 = \sqrt{(a+c)^2 + M\,P^2} = \sqrt{(a+c)^2 + r^2 - c^2} = \sqrt{a^2 + 2\,a\,c + r^2}$$

Seine Fläche ist $F_0 = \pi(a^2 + 2\,a\,c + r^2)$. Sicherer als durch Rechnung können wir R_0 bestimmen, indem wir den Papierstreifen $x\,y$ mit dem Pol P festspießen und diejenige Lage des Fahrstiftes ausprobieren, bei der das Meßrädchen sich beim Bewegen des Streifens um P herum nicht abwickelt (Fig. 23).

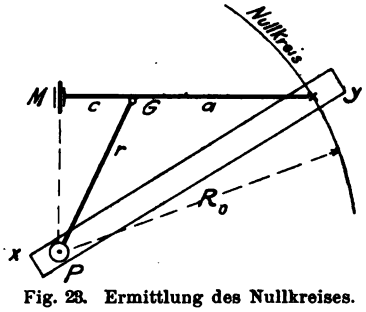


Fig. 23. Ermittlung des Nullkreises.

Wir kehren nun zur Fig. 22 zurück. M wickelt sich ebenso ab, wie M' es tun würde, bei einer vollen Umfahrung wickelt sich also eine Bogenlänge $s = 2\varrho\pi$ ab. ϱ läßt sich nun durch die anderen bekannten Größen ersetzen. Es ist $R^2 - (a + c - \varrho)^2 = r^2 - (\varrho - c)^2$, nämlich beides nach dem Pythagoras gleich $\overline{PQ}^2$, also ist $R^2 - a^2 + 2\,a\,(\varrho - c) = r^2$ und $\varrho = \dfrac{a^2 + 2ac + r^2}{2a} - \dfrac{R^2}{2a}$ oder auch $\varrho = \dfrac{R_0^2 - R^2}{2a}$, wo R_0 der Radius des Nullkreises ist. Der abgewickelte Bogen des Meßrädchens ist also $s = \dfrac{\pi}{a} \cdot (R_0^2 - R^2)$.

Umfahren wir einen zweiten Kreis vom Radius R' statt R mit dem Fahrstift, so wird diesmal ein Bogen $s' = \dfrac{\pi}{a} \cdot (R_0^2 - R'^2)$ abgewickelt werden.

Nun sehen wir leicht, was wir erhalten, wenn wir eine Fläche, wie die in Fig. 24 schraffierte, umfahren, die einen Kreisring mit dem Pol P des Instruments als Mittelpunkt bildet, der an einer Stelle ganz schmal aufgeschlitzt ist. Wir führen den Fahrstift überall in der Pfeilrichtung, daher passieren wir die radiale Strecke an der Aufschlitzung einmal nach innen gehend, einmal nach außen gehend, dabei wickelt sich das Meßrad einmal vorwärts, einmal rückwärts um gleich viel ab: die radialen Strecken heben sich also in ihrer Wirkung heraus. Die beiden den Ring begrenzenden Kreise werden auch in einander entgegengesetztem Sinne durchlaufen, das Meßrädchen läuft also einmal um die eben abgeleitete Größe s vorwärts, einmal um s' rückwärts und wird sich zum Schluß um $b = s - s'$ abgewickelt haben. Diese gesamte Abwicklung ist also $b = \dfrac{\pi}{a} \cdot (R^2 - R'^2)$. Schreiben

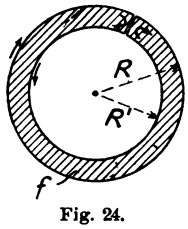


Fig. 24.

wir dafür $R^2\pi - R'^2\pi = a \cdot b$, so haben wir links den Inhalt f der umfahrenen Ringfläche. Es ist also die umfahrene Fläche

$$f = a \cdot b, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

gleich dem Produkte aus der (konstanten) Länge a des Fahrarms und dem am Meßrädchen abgewickelten Bogen b.

Nun sehen wir weiter, daß die Beziehung $f = a \cdot b$ auch für den in Fig. 25 schraffierten Teil eines konzentrischen Ringes gilt. Die radialen Strecken *2 3* und *4 1* werden in entgegengesetztem Sinne durchlaufen, heben sich also heraus. Beim Durchfahren der Kreisbögen *1 2* und *3 4* wickelt sich weniger am Meßrädchen ab als früher beim Umfahren der ganzen Kreise, aber gerade in dem Verhältnis weniger, in dem die jetzige Fläche zum ganzen Ring steht. Abgewickelter Bogen und umfahrene Fläche sind also einander proportional vermindert und Formel (1) bleibt bestehen.

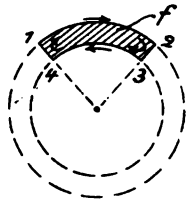


Fig. 25.

Eine unregelmäßige Fläche endlich können wir, wie Fig. 26 andeutet, aus einer Anzahl — nötigenfalls unendlich vielen — Ringstücken zusammengesetzt denken. Die inneren Kreisbögen würden je einmal hin und zurück durchlaufen werden, wir können sie also auslassen, und wenn wir nur die äußeren Umrisse umfahren, so gilt auch hier: $f = a \cdot b$.

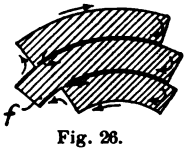


Fig. 26.

Ist die zu umfahrende Fläche so ausgedehnt, daß man nicht alle Punkte des Umfangs erreichen kann, wenn der Pol P der Aufstellung außerhalb der Fläche liegt, so kann man die Fläche entweder in Teile zerlegen — oder aber man wählt einen *Pol im Innern der Figur*.

Diesen Fall führen wir mit Hilfe des Nullkreises auf den früheren zurück. In Fig. 27 soll der Inhalt der g a n z e n unregelmäßigen Figur bestimmt werden. Offenbar ist die schraffierte Figur um den Inhalt des Nullkreises kleiner als die gesuchte, für die schraffierte Figur aber gilt unsere Theorie ohne weiteres. Die gesuchte Figur hat also den Flächeninhalt: Planimeterablesung plus Inhalt des Nullkreises. Da nun beim Durchfahren des Nullkreises das Meßrädchen stillsteht, da sich ferner die zum Nullkreis führenden Strecken in ihrer Wirkung aufheben, so können wir uns deren Umfahrung ersparen und haben einfach die Regel: Liegt der Pol im Innern der Figur, so ist die Ablesung am Meßrädchen, um den Inhalt F_0 des Nullkreises zu vermehren. Dessen Radius R_0 bestimmt man durch Versuch, wie bei Fig. 23 angegeben.

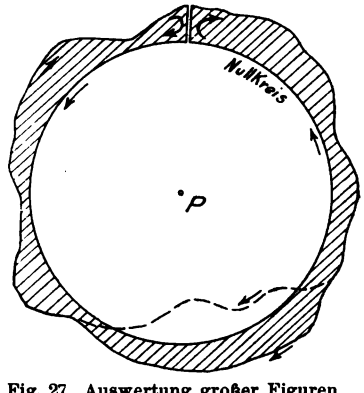


Fig. 27. Auswertung großer Figuren, Pol innen.

Wir ziehen einige *Folgerungen aus der Theorie*. Es war $f = a \cdot b$; Fläche = Fahrarm × abgewickelter Bogen. Die übrigen Abmessungen des Planimeters sind auf seine Wirksamkeit ohne Einfluß. Man darf also die Länge des Fahrarms nicht durch Verbiegen des Fahrstiftes ändern, sonst ändert sich der Wert der Skala am Meßrad. Dagegen ist gleichgültig der Ort, wo das Meßrädchen angebracht ist, sofern nur seine Achse parallel dem Fahrarm bleibt. Man findet die in Fig. 28 und 29 dargestellten Anordnungen. Fig. 29, bei der man den Fahrarm nicht ändern kann, ist empfehlenswerter für einfache Zwecke. Bei Fig. 28 und 29 ist der Polarm nicht fest mit dem Fahrarm verbunden, sondern an eine Hülse angelenkt, die auf dem Fahrarm verstellbar ist. Man kann so die wirksame Länge $GF = a$ des Fahrarmes ändern; je kürzer man ihn einstellt, ein desto größerer Bogen b wickelt sich ab beim Umfahren einer bestimmten Fläche, desto genauer kann man also die Ablesung der umfahrenen Fläche bewirken; daß darum die Messung genauer wird, ist nicht gesagt, denn die Genauigkeit der Messung ist unter Umständen durch andere Einflüsse begrenzt, so durch die Schwierigkeit, den Umrissen der Figur sauber zu folgen, oder durch die Genauigkeit der Figur selbst. Es hätte aber keinen Zweck, die Ablesung weiter zu treiben, als diese Grenzen angeben (S. 27). Auch kann man nach Verkürzung des Fahrarmes nur noch kleinere Figuren umfahren.

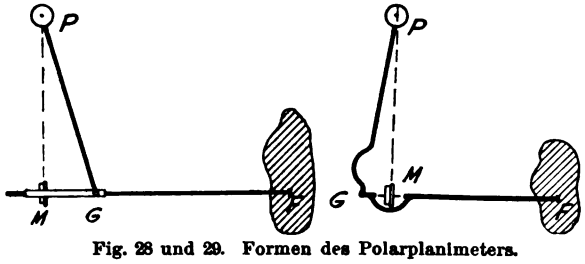


Fig. 28 und 29. Formen des Polarplanimeters.

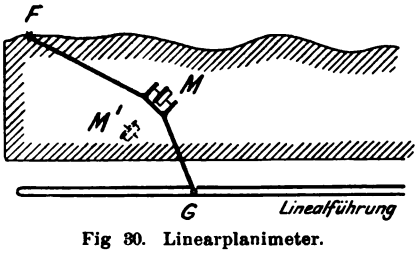


Fig 30. Linearplanimeter.

Die Länge des Lenkers PG ist auf den abgewickelten Bogen ohne Einfluß. Man kann den Lenker also auch unendlich lang machen, d. h den Punkt G geradlinig führen. Dadurch entsteht aus dem Polar- ein *Linearplanimeter*, wie solches in Fig. 30 dargestellt ist. Das Meßrädchen M bewegt sich genau so, wie ein bei M' befindliches. Das Linearplanimeter ist bequemer als das Polarinstrument, wenn man sehr langgestreckte Figuren, etwa die Schaubilder selbstschreibender Meßinstrumente, ausmitteln will. Mit dem Polarplanimeter kann man das nur stückweise.

Die *Genauigkeit des Planimeters* ist beim Ausmessen länglicher Figuren geringer als beim Ausmessen rundlicher, weil bei ersteren das Verhältnis Umfang zu Fläche größer wird und Ungenauigkeiten des Umfahrens mehr Einfluß erlangen.

Beim Gebrauch erhält man die genauesten Resultate, wenn man dafür sorgt, daß das Meßrad möglichst rollt, möglichst wenig gleitet. Außerdem wird man dafür sorgen müssen, daß das Meßrad nicht unnütz weit in einer Richtung sich abwickelt und dann wieder zurückrollt, so daß man das Endresultat gewissermaßen als Differenz zweier Abwicklungen abliest, sondern das Meßrad soll möglichst immer in einem Sinne vorwärts rollend in seine Stellung gelangen. Letztere Bedingung zu erfüllen, lege man den Schwerpunkt der Figur auf den Nullkreis, die erste erfüllt man, indem man noch die Längenrichtung der Figur radial zum Nullkreis legt.

Bei Beachtung dieser Regeln ermittelt das einfache Polarplanimeter Flächen — je nach Umständen, je nachdem das Verhältnis Umfang zu Fläche, ungünstig oder günstig ist — auf $^1/_5\%$ genau, anderenfalls aber kommen Fehler von 1% leicht vor. Man erhält genauere Werte durch mehrfaches Umfahren der auszumessenden Figur, am besten unter

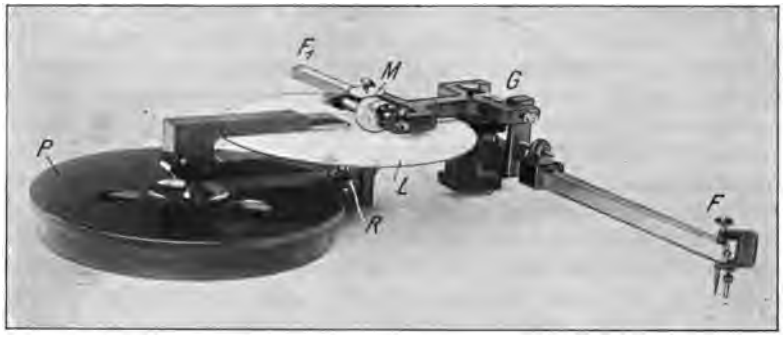


Fig. 31. Scheibenplanimeter von Coradi.

Ablesung des Standes nach jeder Umfahrung, aber sonst ohne abzusetzen, so daß man in der Gleichmäßigkeit der Differenzen eine Kontrolle hat.

Wesentlich ist, daß die Achse des Meßrades parallel zur Fahrarmachse steht. Steht sie schief, so macht das Planimeter für dieselbe Fläche verschiedene Angaben, je nach der Lage des Planimeterpols. Fig. 18 ist als Kompensationsplanimeter gebaut: man kann den Fahrarm durchschlagen, so daß der Lenker einmal von rechts, einmal von links auf ihn trifft. Verschiedenheit der Meßergebnisse in beiden Anordnungen deutet auf schiefe Stellung der Meßrolle, der Mittelwert beider Ablesungen ist von dem Fehler frei. —

Eine andere vorzügliche Form des Planimeters ist das in Fig. 31 abgebildete *Scheibenplanimeter*. Hier ist der Pol nicht ein Nadelpol, sondern besteht aus einem schweren Metallstück P, um dessen als Kugelgelenk ausgebildete Mitte die übrigen Teile schwingen. Diese bestehen auch aus einem Polarm und einem Fahrarm, die bei G durch eine senkrechte Achse gelenkig miteinander verbunden sind; der Fahr-

arm FF_1 trägt den Fahrstift F, mit dem man die auszumessende Figur umfährt. Nun ist in dem Polarm eine mit Papier beklebte Laufscheibe L mit senkrechter Achse gelagert; das auf derselben Achse sitzende Rädchen R greift mittels sehr feiner Zähnung in eine entsprechende Zähnung am Umfange der Polscheibe ein, daher läuft die Scheibe ziemlich schnell um ihre Achse, wenn der Polarm um die Polscheibe schwingt. Auf der Laufscheibe läuft das Meßrad M, das mit dem Fahrarm verbunden ist, so daß es dessen Bewegungen im Gelenk G mitmacht und daher in der Mittelstellung nahe der Mitte, in den Endstellungen aber nahe dem Rande der Laufscheibe läuft. Der Arm MG ist übrigens am eigentlichen Fahrarm mit einer wagerecht parallel zur Fahrarmlänge liegenden Achse angelenkt, so daß da Meßrad M stets auf die Laufscheibe L herabfallen kann. — Das Meßrad wickelt nun, auf der Laufscheibe laufend, Bögen ab, deren Länge einerseits von der Geschwindigkeit der Scheibenumdrehung, andererseits von der Lage des Berührungspunktes auf der Scheibe abhängt. Diese Einflüsse wirken so zusammen, daß die abgewickelten Bögen der umfahrenen Fläche proportional sind.

Die Genauigkeit des Scheibenplanimeters ist viel größer als die des einfachen Polarplanimeters. Daß das Laufrad stets auf der Scheibe läuft, fällt freilich mehr für Landmesser beim Ausmessen krauser Pläne ins Gewicht. Aber das Zusammenarbeiten der Teile ist so, daß das Laufrad sehr große Abwicklungen macht, und daß diese bei nicht sehr unregelmäßigen Figuren fast nur vorwärts erfolgen. Außerdem ist das Scheibenplanimeter wenig empfindlich dafür, ob man genau auf den Ausgangspunkt zurückkehrt, wenn man diesen so wählt, daß das Meßrad nahe der Scheibenmitte steht; in dieser Gegend führt nämlich das Meßrädchen gar keine Bewegungen aus: eine Drehung im Gelenk G hat keinen Einfluß, weil die Scheibe nicht umläuft; eine Drehung um den Pol hat trotz der Scheibenbewegung keinen Einfluß, weil die Meßradebene radial zur Scheibe steht. — Die Verkürzung des Fahrarms hat ähnliche Wirkungen wie beim einfachen Polarplanimeter; doch bleiben die zu umfahrenden Flächen auch bei kurzem Arm noch recht ansehnlich.

Dem Namen nach sei das *Rollplanimeter* als zum Ausmessen langer Figuren geeignet erwähnt. Einige Planimeter, welche einfacher sind als die besprochenen, sind nicht zu empfehlen: so ist das Pryzsche *Stangenplanimeter* mehr interessant als brauchbar. *Integraphen* sind Instrumente, welche zu einer gegebenen Kurve $y = f(x)$ die Integralkurve $y' = \int f(x)\,dx$ graphisch verzeichnen; die von ihnen verzeichnete Endordinate stellt also ebenfalls die Fläche unter der gegebenen Kurve dar. Nur kann man noch die Aufaddierung Schritt für Schritt verfolgen. Auch diese Instrumente sind für unsere Zwecke unwesentlich.

22. Simpsonsche Regel. Wo man ein Polarplanimeter nicht zur Hand hat, berechnet man die Flächen nach der *Simpsonschen Regel*. Eine Umgehung der Simpsonschen Regel ist das folgende Verfahren von Wagener: Man hält sich ein für allemal, etwa auf Pauspapier oder Zelluloid gezeichnet, ein Gitter wie Fig. 32, bestehend aus einer Anzahl Parallelen in gleichem Abstand; die punktierten Linien mar-

kieren ein Viertel des Abstandes der benachbarten Parallelen. Dieses Gitter legt man auf die zu messende Figur, so daß sie auf zwei der Parallelen endet. Man hat die starken Strecken zu addieren, dabei indessen die erste und letzte, die auf punktierten Linien liegen, nur halb zu nehmen — und hat die erhaltene Summe mit dem bekannten Abstand der Parallelen zu multiplizieren, dann ist das Ergebnis der Inhalt der Fläche. Die Begründung ist einfach: die starke Strecke auf der Parallelen *6* ist die mittlere Breite des schraffierten Trapezes, dessen Höhe gleich dem Parallelenabstand ist. Durch Aufaddieren der starken Strecken erhält man die Summen solcher Trapeze. An den beiden Enden des Diagramms bleiben Flächen von halber Breite, deshalb muß man die auf punktierten Linien liegenden Strecken nur halb nehmen. Das Aufaddieren der Strecken macht man mit einem Zirkel oder durch Aneinandertragen auf einem Streifen Papier.

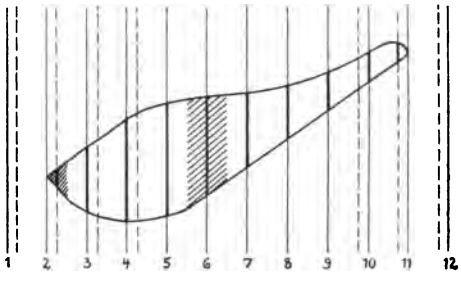


Fig. 32. Ausmessen des Flächeninhaltes (Harfenplanimeter).

VI. Messung der Spannung.

23. Einheiten. Flüssigkeiten geben einen Druck, den sie an einer Stelle empfangen, nach allen Richtungen und durch die ganze Flüssigkeit hindurch weiter. Die Flüssigkeitsteilchen üben daher aufeinander und auf die Gefäßwand Pressungen aus, so zwar, daß auf jede Flächeneinheit dieselbe Kraft kommt, gleichgültig, welche Richtung und Gestalt die Fläche hat. Nur in der Richtung von oben nach unten nimmt die Spannung, entsprechend dem spezifischen Gewicht γ kg/cbm des Mediums, für jedes Meter Standhöhe um je γ kg/qm $= \frac{\gamma}{10\,000}$ kg/qcm zu. Den in einer bestimmten Höhenlage auf die Flächeneinheit kommenden Druck nennt man den *spezifischen Druck* oder die *Spannung* der Flüssigkeit in dieser Höhe.

Für Gase gilt das gleiche, auch hinsichtlich der Abnahme der Spannung mit der Höhe um γ kg/qm für je 1 m Standhöhe.

Auch auf feste Körper ist der Begriff der Spannung anwendbar; bei ihnen kann die Spannung an verschiedenen Punkten verschieden sein, und an ein und demselben Punkt ist sie nach verschiedenen Richtungen hin nicht die gleiche. Die Spannung fester Körper wird bei Materialprüfungen festgestellt. Für uns handelt es sich nur um die

Spannung von Flüssigkeiten und Gasen. Diese sind stets Druckspannungen. Bei festen Körpern können auch Zugspannungen vorkommen, die nötigenfalls durch ein negatives Vorzeichen kenntlich gemacht werden.

Die Spannung ist also die auf die Flächeneinheit ausgeübte Kraft. Demnach ist ihre *Einheit* diejenige Spannung, welche auf das Quadratmeter Fläche die Kraft von einem Kilogramm ausübt: 1 kg/qm.

In der Praxis ist als Einheit der Spannung das Kilogramm pro Quadratzentimeter gebräuchlicher, weil man dadurch die Resultate in weniger hohen Zahlen erhält. Es ist $1 \frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = \frac{1\,\text{kg}}{\frac{1}{10000}\,\text{qm}} = 10\,000 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$. Man bezeichnet diese Einheit auch wohl als metrische Atmosphäre: 1 kg/qcm = 1 at. Diese Benennung rührt daher, daß die durch Barometer meßbare Spannung der uns umgebenden Luftatmosphäre ungefähr 1 kg/qcm beträgt: sie wechselt bekanntlich je nach der Höhenlage des Beobachtungsortes und je nach der Witterung.

Außer diesen vom technischen Maßsystem hergeleiteten sind noch rein empirische Einheiten gebräuchlich. Diese empirischen Einheiten sind das Millimeter Quecksilbersäule oder Wassersäule und die physikalische Atmosphäre von 760 mm Quecksilbersäule. Auch rechnet man wohl mit der in Metern oder Millimetern anzugebenden Säule einer anderen Flüssigkeit, auf deren spezifisches Gewicht γ es dann ankommt.

Eine *Flüssigkeits- oder Gassäule* wird nämlich unter dem Einfluß der Schwerkraft auf die sie unten abschließende Fläche eine Spannung ausüben, die von der Höhe der Säule abhängt, also durch deren Höhe gemessen werden kann. Habe die Säule 1 qm Querschnitt und eine Höhe von h m, so ist das in ihr enthaltene Volumen h cbm; wenn wir das spezifische Gewicht des die Säule bildenden Mediums mit γ kg/cbm bezeichnen, so sind $h \cdot \gamma$ kg in der Säule enthalten, die also auf die Grundfläche der Säule von gerade 1 qm die Spannung $h \cdot \gamma \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$ ausübt. Daher ist

$$h \text{ m FlS} = h \cdot \gamma \frac{\text{kg}}{\text{qm}}; \qquad 1 \text{ m FlS} = \gamma \frac{\text{kg}}{\text{qm}} \ldots . \quad (1)$$

Hiermit ist zugleich die Begründung für die Abnahme des Drucks mit der Höhe gegeben, von der oben schon gesprochen wurde.

Für kaltes Wasser insbesondere ist $\gamma = 1000$ kg/cbm, also 1 m WS = 1000 kg/qm oder

$$1 \text{ mm WS} = 1 \text{ kg/qm} \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

In der Tat, denken wir die Fläche von 1 qm gerade 1 mm hoch mit Wasser bedeckt, so ist 1 ltr = 1 kg Wasser auf jenem Quadratmeter vorhanden. — Es ist auch

$$10 \text{ m WS} = 10\,000 \text{ kg/qm} = 1 \text{ kg/qcm} = 1 \text{ at} \ldots . \quad (3)$$

Für Quecksilber von 0° Temperatur ist $\gamma = 13\,560$ kg/cbm zu setzen (13,56 in physikalischer Ausdrucksweise), also 1 m QuS = 13 560 kg/qm = 1,356 kg/qcm oder

$$1 \text{ kg/qcm} = 735{,}5 \text{ mm QuS} = 1 \text{ at} \ldots \ldots \quad (4)$$

Die Spannung von 760 mm QuS = 1,033 kg/qcm = 1,033 at = 10 333 kg/qm wird wohl als normaler Barometerstand am Meeresspiegel angesehen und deshalb auch als (physikalische) Atmosphäre bezeichnet. Diese letztere Benennung sollte man auf jeden Fall in technischen Werken vermeiden, weil das Vorhandensein zweier gleichbenannter Einheiten, die nur um reichlich 3% voneinander verschieden sind, zu Irrtümern Anlaß gibt, die größer als zulässig, aber zu klein sind, als daß man sie ohne weiteres bemerkt. Ganz entraten kann man der Annahme von 760 mm QuS als normalen Barometerstandes deshalb nicht, weil man die Gasvolumina (S. 108) und die Siedepunkte auf diesen Normaldruck zu beziehen pflegt, weil die Thermometerskala auf der Annahme dieses Barometerstandes als des normalen beruht (S. 103), und weil daher die Zahlen für das mechanische Wärmeäquivalent, für die spezifischen Gewichte, die Ausdehnungskoeffizienten, kurz viele Tabellenwerke geändert würden, wollte man die technische Atmosphäre allein einführen. Man kann aber Verwechselungen dadurch umgehen, daß man sagt, man beziehe das Gasvolumen auf 760 mm QuS, statt: auf Atmosphärenspannung. Außerdem wird man grundsätzlich nur diesen Normaldruck, nicht aber Vielfache desselben in die Rechnung einführen.

Eine Angabe in Quecksilbersäule meint immer eine Säule von 0° C, eine Angabe in Wassersäule meist eine solche bei +4° C, wo das Wasser seine größte Dichte hat. Nichts steht im Wege, Spannungen eines Mediums von beliebiger Temperatur in diesen Einheiten auszudrücken. Auch kann die Messung mittels einer Quecksilber- oder Wassersäule beliebiger Temperatur geschehen, nur wird dann eine Reduktion auf Normaltemperatur der messenden Säule nötig; diese Reduktion ist für Wasser unerheblich, wenn das Wasser kalt ist, bis zu etwa 20° (Fig. 81, S. 101); für Quecksilber ist sie erheblicher und wird unten besprochen werden (S. 56).

Im *englischen Maßsystem* ist die Einheit der Spannung das Pfund pro Quadratzoll; es ist 1 kg/qcm = 14,22 Pfd/QuZ. Man liest Quecksilbersäulen in Zollen ab und sieht 30 Zoll QuS = 76,199 cm QuS als normalen Barometerstand an.

24. Absoluter Druck, Überdruck, Vakuum. Die Instrumente zum Messen der Spannung heißen Manometer; wenn sie Spannungen unter der Atmosphäre, also ein Vakuum angeben, auch wohl Vakuummeter.

Eindringlich ist nun darauf hinzuweisen, daß alle Manometer nicht Spannungen anzeigen, sondern Spannungsunterschiede. Die gewöhnlichen Manometer, deren Einrichtung weiterhin zu besprechen sein wird, geben den Unterschied der Spannung in dem zu untersuchenden Raum gegen die augenblickliche Spannung der umgebenden Atmosphäre; im Arbeitsraum einer Druckluftgründung gäben sie den Unterschied gegen die Spannung in diesem Raum an. Die von einem Manometer gemachte Angabe bezeichnet man deshalb als *Überdruck*, und wenn es sich um ein Vakuum handelt, als *Unterdruck*.

Die *absolute Spannung* in dem zu untersuchenden Raum ist die Summe: Barometerstand plus Überdruck, oder aber die Differenz:

Barometerstand minus Unterdruck. Bei jeder Spannungsmessung hat man also auch noch den Barometerstand zu beobachten: das Barometer ist derjenige Spannungsmesser, der absolute Spannungen angibt.

Zeigt also das Manometer an einem Dampfkessel 4,25 at an, und ist, an einem hochgelegenen Ort und bei schlechtem Wetter, der Barometerstand mit 705 mm QuS abgelesen, so ist dieser Barometerstand $\frac{705}{735,5} = 0{,}96$ at, und der absolute Druck im Kessel ist $4{,}25 + 0{,}96 = 5{,}21$ at; das Wasser im Kessel würde also nach den Dampftabellen bei 152,4° sieden.

Wo eine Vakuumspannung anzugeben ist, insbesondere also bei Kondensationsdampfmaschinen und bei Vakuumkochgefäßen, geschieht die Angabe auf verschiedene Weise.

Zunächst kann man die *Vakuumangabe* so lassen, wie man sie abliest, oder aber man kann eine Reduktion der Ablesung auf den normalen Barometerstand von 760 mm QuS vornehmen, indem man zum abgelesenen Vakuum die Differenz $760 - b$, also die Abweichung des Barometerstandes vom normalen, hinzuzählt. Durch diese Reduktion eliminiert man also die Schwankungen des Barometerstandes: die Angabe des reduzierten Vakuums ist gleichwertig mit einer Angabe der absoluten Spannung, indem immer die Summe aus reduziertem Vakuum und absoluter Spannung gleich 760 mm QuS ist.

Außerdem kann man ein Vakuum entweder in Millimetern Quecksilbersäule angeben oder aber in Prozenten; und dabei kann man noch die Prozente verschieden berechnen, indem man entweder den momentanen Barometerstand, oder indem man den normalen Barometerstand von 760 mm QuS gleich 100% setzt. Von den hiernach möglichen Berechnungsweisen für bestimmte Ablesungen an Vakuummeter und Barometer sind nur zwei berechtigt, und zwar von diesen die eine oder andere je nach Umständen.

Die Dampftemperatur in einem Kochgefäß oder im Niederdruckzylinder und beim Übertritt in den Kondensator ist vom absoluten Druck, also vom reduzierten Vakuum abhängig. Bei Untersuchung der Temperaturverhältnisse wird man also im allgemeinen reduzieren und wird die Angabe dann in mm QuS oder auch in kg/qcm machen. Die Angabe in Prozenten hat keinen Zweck, hätte sonst aber in Prozenten von 760 mm zu geschehen. Das zweckmäßigste ist übrigens die Angabe der absoluten Spannung statt des Vakuums.

Eine bestimmte Vakuumpumpe kann, je nach der Größe ihres schädlichen Raumes, ein bestimmtes Vakuum erzeugen, so zwar, daß der tiefst erreichbare absolute Druck einen bestimmten Bruchteil der Spannung ausmacht, gegen welche die Pumpe fördert, meist also des augenblicklichen Barometerstandes. Die Luftpumpe wird daher auf einem Berge arbeitend die absolute Spannung weiter herunterziehen können als in der Ebene. Trotzdem wird aber die Ablesung am Vakuummeter auf dem Berge geringer sein als in der Ebene, denn eine Pumpe, die in der Ebene 720 mm QuS Vakuum erzeugen kann, wird auf einem Berge nicht das gleiche erreichen können, wenn der ganze Barometer-

stand vielleicht nur 700 mm QuS ist. Weder die Angabe des reduzierten noch des unreduzierten Vakuums noch die des absoluten Druckes läßt der Pumpe Gerechtigkeit angedeihen, wenn man sie nach mm QuS oder nach kg/qcm macht. Zweckentsprechend ist nur die Angabe des Vakuums in Prozenten des absoluten Vakuums, und zwar in Prozenten des augenblicklichen Barometerstandes.

Ein *Beispiel* wird den Gang der Rechnung zeigen. Man habe ein Vakuum von 652 mm QuS und einen Barometerstand von 711 mm QuS abgelesen. Die absolute Spannung ist dann 711 — 652 = 59 mm QuS, das reduzierte Vakuum 760 — 59 = 701 mm QuS oder auch wohl $\frac{701}{760} \cdot 100 = 92{,}3\%$, wenn es sich um Dampftemperaturen handelt. Handelt es sich dagegen um die Untersuchung der Luftpumpe, so wird man $\frac{652}{711} \cdot 100 = 91{,}7\%$ Vakuum anzugeben haben. Wie man sieht, weichen die beiden richtigen Berechnungsweisen nicht sehr voneinander ab, bei schlechterem Vakuum freilich etwas mehr.

Ganz falsche Ergebnisse aber erhält man bei Vakuummetern mit Prozentteilung, bei denen also der Skalenbereich von 0 bis 760 mm Vakuum in 100 Teile geteilt und entsprechend beziffert ist. Solch Instrument hätte uns $\frac{652}{760} \cdot 100 = 85{,}8\%$ Vakuum angezeigt, daraus hätten wir vielleicht einen absoluten Druck $760 \cdot \frac{100 - 85{,}8}{100} = 108$ mm QuS errechnet und eine Dampftemperatur von 54°, während dem wirklichen absoluten Druck von 59 mm QuS eine Siedetemperatur von 42° entspricht.

Eine *Einteilung der Vakuummeter* in Prozente ist Unsinn, da sie nur beim normalen Barometerstand richtig sein kann. Die Bezifferung des Skalenbereichs (0 bis 760 mm QuS) von 0 bis 1 gibt zu gleichen Irrtümern Anlaß. Vakuummeter müssen in mm QuS oder in kg/qcm geteilt sein. Die Teilung kann ruhig über 760 mm oder über 1 kg/qcm hinausgeführt sein. Es ist einmal nichts daran zu ändern, daß der Nullpunkt der Vakuumskala stets dem augenblicklichen Barometerstande entspricht, also veränderlich ist. Das Vakuum läßt sich in Prozente umrechnen, aber nicht so messen.

Bei *Kühlanlagen* findet man Manometer, die in ° C geteilt sind entsprechend den Verdampfungstemperaturen des arbeitenden Mediums bei verschiedenen Spannungen. Man wird nach dem Gesagten erkennen, daß auch dies theoretisch unzulässig ist, doch verschwinden die auftretenden Fehler, wenn es sich um größere Spannungen über der atmosphärischen handelt, wo dann die Schwankungen des Barometerstandes unbedeutend sind gegenüber der Gesamtspannung.

25. Federmanometer. Die Metall- oder Federmanometer sind Röhrenfeder- oder Plattenfederinstrumente.

In den *Röhrenfedermanometern* ist der wirksame Teil die Bourdonsche Röhrenfeder (Fig. 33 und 34). Diese ist ein gebogenes Rohr von flachem Querschnitt, in deren Inneres von unten die zu messende Spannung eintritt. Das andere Ende der Röhrenfeder ist geschlossen. Eine solche Feder hat unter der Einwirkung des inneren Überdrucks

die Tendenz, sich gerade zu strecken[1]). Dieser Tendenz wirkt die Elastizität des Federmaterials entgegen. Daher ändert die Feder ihre Krümmung je nach der Spannung im Innern; ihr freies Ende bewegt sich hin und her und betätigt den Zeiger, der vor einer Skala spielt.

Man hat es in der Hand, Manometer bis zu den verschiedensten Spannungen herzustellen, indem man das Material, die Form, den Querschnitt und die Wandstärke der Feder verändert. Für kleine Spannungen macht man die Feder aus nachgiebiger Kupferlegierung, man macht sie möglichst lang gekrümmt, führt sie mit so geringer Wandstärke und so flach aus, daß das Trägheitsmoment ihres Querschnittes klein wird (Fig. 33). Für große Spannungen verwendet man aus massivem Stahl gebohrte Federn, denen man die Form Fig. 34 gibt und

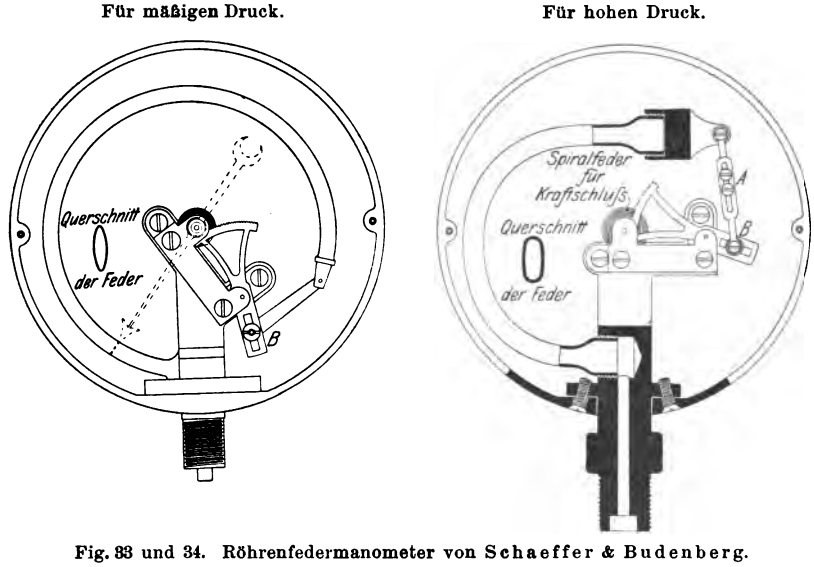


Fig. 33 und 34. Röhrenfedermanometer von Schaeffer & Budenberg.

deren Querschnitt nach dem Ausbohren nur wenig elliptisch gemacht ist. Bei genügender Wandstärke sind solche Federn bis zu 200 at und weiter brauchbar, für hydraulische Zwecke.

Plattenfedermanometer haben die Einrichtung Fig. 35. Eine dünne gehärtete Stahlblechplatte ist am Umfange eingeklemmt. Tritt Spannung unter die Platte, so wird ihre Mitte aufwärts gedrückt und der Zeiger bewegt. Um die Platte nachgiebiger zu machen, versieht man sie mit ringförmigen Wellen. Trotzdem bleibt der Ausschlag ein geringer, 1 bis 2 mm, und das ist der Nachteil der Platten- hinter der Röhrenfeder, deren freies Ende 6 bis 10 mm Ausschlag, von Null bis Höchstspannung, ausführt. Denn um eine genügende Zeigerbewegung zu erhalten, muß man beim Plattenfedermanometer stärkere Übersetzung zum Zeiger hin anwenden, und das vergrößert auch den toten

[1]) Theorie siehe Lorenz, Z. Ver. deutsch. Ing. 1910, S. 1865.

Gang. Dafür ist die Plattenfeder, wegen ihrer geringen Eigenmasse, weniger empfindlich für Erschütterungen. Auf Lokomotiven verwendet man daher gerne Plattenfedermanometer, sonst zieht man meist Röhrenfedermanometer vor.

Um bei der Herstellung und später bei einer Instandsetzung eines Manometers die gewünschte Einstellung des Zeigerwerkes erreichen zu können, hat das Getriebe jedes Manometers im allgemeinen zwei Nachstellmöglichkeiten. Die in Fig. 34 und 35 mit *A* bezeichnete läßt ein Glied kürzen oder verlängern und gestattet dadurch die Einstellung des Zeigers auf den Nullpunkt; Fig. 33 hat diese Einstellung nicht, die allerdings entbehrlich ist, weil man entweder den Zeiger auf seiner Achse versetzen oder den Zahnbogen mit dem Trieb verschieden zum Eingriff bringen kann. Weniger entbehrlich ist die in Fig. 33 bis 35 mit *B* bezeichnete Einstellung, mittels deren man, nach Festlegung des Nullpunktes, den Abstand der Druckintervalle auf der Skala ändern kann durch Änderung der wirksamen Hebellängen.

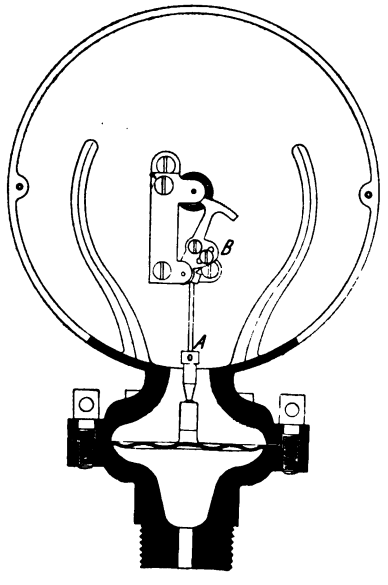


Fig. 35. Plattenfedermanometer von Schaeffer & Budenberg.

Die Federmanometer sind die im praktischen Betriebe meist verwendeten. Bei ihrer Anwendung hat man zu beachten, daß man vor der Ablesung ans Gehäuse klopfen muß, um durch die Erschütterung die Reibung zu beseitigen. Tut man das, so zeigen die Instrumente bei steigender Spannung befriedigend das gleiche an wie bei sinkender, ihre Empfindlichkeit ist dann sehr groß.

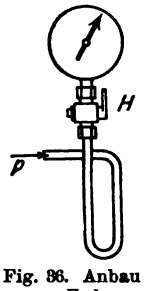


Fig. 36. Anbau von Federmanometern an Dampfleitungen.

Die Federn, und zwar namentlich die Röhrenfedern, ändern ihre Elastizität, wenn sie warm werden; dadurch würde die Skala falsch und eine Neueichung nötig. Sind auch gute Fabrikate nicht sehr empfindlich in diesem Punkt, so soll man doch den Eintritt von Dampf in die Feder vermeiden, indem man eine *Schleife* vor das Manometer setzt (Fig. 36). In ihr sammelt sich Wasser, und nur dieses tritt in die Röhrenfeder ein. Zwischen Manometer und Schleife setzt man einen *Hahn H*. Der Hahn hat eine seitliche Bohrung von kleinem Durchmesser ($^1/_2$ mm), ist also ein Dreiwegehahn. Durch die feine Bohrung kann man das Manometer oder die Zuleitung mit der Atmosphäre in Verbindung bringen, ersteres zur Nachprüfung des Nullpunktes, letzteres, um die Leitung freizublasen. Der Hahn wird, wenn die zu messende Spannung perio-

disch schnell schwankt, so weit abgedrosselt, daß man den Mittelwert sicher ablesen kann. Der Hahn wirkt als Flüssigkeitsbremse und vergrößert die Dämpfung des Instrumentes. Zu gleichen Zwecken schaltet man auch kleine Wasserbehälter vor das Manometer, die meist noch eine feine Bohrung haben, um schnelle Spannungsstöße zu mildern, die das Werk schädigen würden. Auch Rosten im Innern ändert die Elastizität der Feder, weil die Wandstärke kleiner wird. Man hindert das Rosten der stählernen Federn von hydraulischen Manometern durch einen Asphaltüberzug, oder besser noch durch ein feines Kupferblech; in die Röhrenfeder führt man ein dünnes Kupferrohr ein und bläht es durch Wasserdruck auf, so daß es sich dem Federrohr von innen anschmiegt.

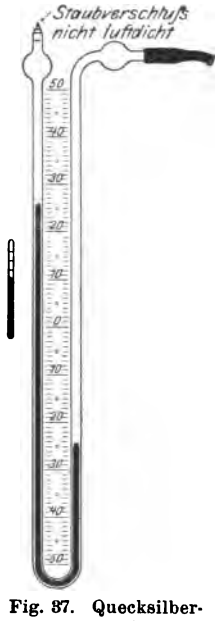


Fig. 37. Quecksilbermanometer.

26. Flüssigkeitsmanometer. *Quecksilbermanometer* bestehen aus einem U-förmigen Rohr (Fig. 37). Der eine Schenkel ist offen, der andere mit dem zu untersuchenden Raum verbunden. Die Ablesung geschieht durch Beobachten beider Quecksilberkuppen; denn nur wenn beide Schenkel genau gleich weit sind, könnte man sich mit einer Ablesung begnügen und sie verdoppeln; auch müßte dazu das Quecksilber sehr genau abgemessen sein, so daß es im Stillstand auf Null steht. Die Kapillarität verursacht bei Rohren über 5 mm lichter Weite keinen wesentlichen Fehler, auch hebt sich beim U-Rohr ihre Wirkung in beiden Schenkeln mehr oder weniger auf. Doch ist die Ablesung auf 0° C Quecksilbertemperatur zu reduzieren; da nämlich warmes Quecksilber leichter ist, so wird die Ablesung bei gleicher Spannung größer: nur bei 0° C ist 735,5 mm QuS = 1 kg/qcm, nur bei 0° C ist 760 mm QuS die Normalspannung. Entsprechend der Quecksilbertemperatur hat man also die Ablesung um so viel Prozente zu verkleinern, wie Fig. 38 angibt: Diese stellt das Verhältnis der spezifischen Gewichte des Quecksilbers bei $t°$ zu dem bei 0° dar. Die *Temperaturberichtigung* macht also meist minus $^1/_3$% aus. — Man ermittelt die Fadentemperatur, indem man ein Thermometer neben das Manometer hängt, die Kugel in halber Höhe der messenden Quecksilbersäule — oder man schätzt sie einfach.

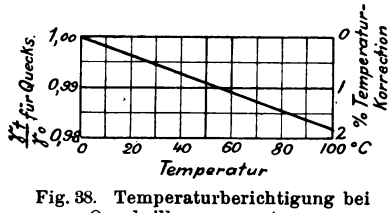


Fig. 38. Temperaturberichtigung bei Quecksilbermanometern.

Etwas bequemer zum Ablesen sind einschenklige Quecksilbermanometer: ein Glasrohr taucht unten in ein Gefäß und ist oben offen. Die zu messende Spannung wird in das Gefäß geleitet, so daß sie auf den Quecksilberspiegel drückt und das Quecksilber in die Höhe treibt. Man hat hier nur an einer Skala abzulesen — bei der vorigen Anordnung

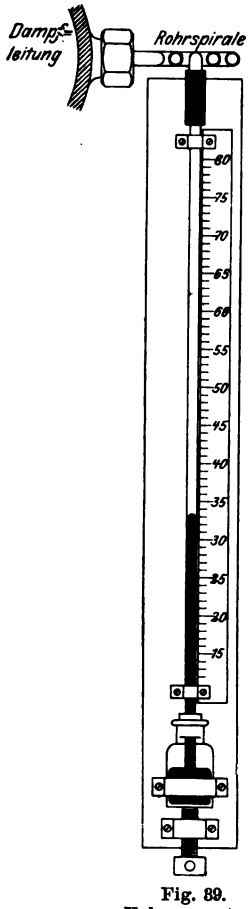


Fig. 39. Vakuummeter.

waren die Ablesungen an zwei Säulen zu addieren. Die Änderungen des Quecksilberstandes im Gefäß sind nämlich gering. Um sie trotzdem zu berücksichtigen, macht man entweder die Skala oder das Gefäß verschiebbar, oder aber man teilt die Skala nicht genau in Zentimeter, sondern etwas enger. Die ersten beiden Anordnungen, bei denen man dann den Nullpunkt der Skala nach dem Quecksilberspiegel im Gefäß einstellt, sind vorzuziehen; bei der letzten nämlich ist das Einstellen des Nullpunktes durch Nachfüllen von Quecksilber sehr lästig. — Fig. 39 zeigt das Gefäßmanometer für Vakuum; das Gefäß ist nachstellbar, die obere Rohrspirale soll Störungen durch eine Wassersäule verhindern, die sich über dem Quecksilber bilden könnte (S. 69). Man hat auch direkt den absoluten Druck in einem Kondensator und dergleichen bestimmt mit Hilfe eines *abgekürzten Barometers* (Fig. 40): der eine Schenkel ist so zugeschmolzen, daß keine Luft über dem Quecksilber bleibt, der andere mit dem Kondensator verbunden. Auskochen wie bei Barometern ist erforderlich, auch ist Eintreten von Luftbläschen zu vermeiden, sonst zeigt das Instrument zu gutes Vakuum; das ist sein Fehler, der sich im Laufe der Benutzung leicht wieder einstellt.

Als Normalinstrument zur Eichung von Federmanometern führt man das Quecksilbermanometer bis zu höheren Spannungen nach Fig. 41 aus. Das Gefäß ist aus Eisen, das Steigrohr aus starkwandigem Glasrohr, das in Abständen von etwa 2 m gestoßen wird. Der Stoß ist durch eine Gußeisenmuffe mit Lederstulpstopfbüchsen gedichtet. Zum Ablesen muß man mittels Leiter am Steigrohr auf und ab klettern können. Bequemer ist die Vorrichtung der Fig. 41 mit 2 Spiegeln $S_1 S_2$ und Fernrohr; Spiegel S_1 und mit ihm eine Lampe zum Erhellen der Skala ist senkrecht verschiebbar: so kann man den Stand der Säule im Fernrohr ablesen. Das längste derartige Instrument erstreckt sich über die Höhe des Eiffelturms (300 m, entsprechend 400 at). Die Genauigkeit längerer derartiger Instrumente wird durch die Schwierigkeit beeinträchtigt, die Temperatur des Quecksilberfadens gut zu berücksichtigen.

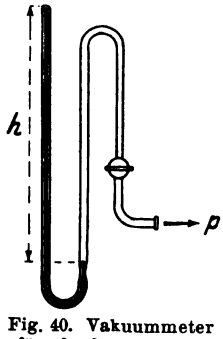


Fig. 40. Vakuummeter für absoluten Druck.

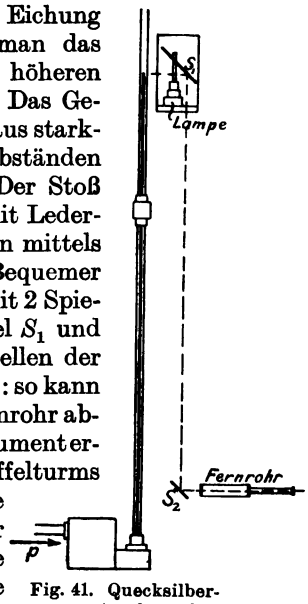


Fig. 41. Quecksilbermanometer für hohen Druck von Schaeffer & Budenberg.

Zum Messen kleinerer Spannungen füllt man die gleichen Instrumente mit Wasser. Fig. 42 bis 44 zeigen einige Formen von *Wassermanometern*, einschenklig, in einem Stück aus Glas geblasen und die Teilung aufs Glas geätzt. In Gasanstalten verwendet man wohl statt Wasser Petroleum zur Füllung: Teerteile verschmieren dann das Instrument nicht, sondern werden gelöst. Die Teilung wird weiter als bei Wasserfüllung und muß auf Millimeter Wassersäule empirisch oder durch Bestimmung des spezifischen Gewichtes des Petroleums reduziert werden. Zu beachten bleibt, daß die Angabe eines Wassermanometers kaum von der Temperatur abhängt (unterhalb 30°, vgl. Fig. 81), daß aber Petroleum erheblich leichter wird bei wachsender Temperatur (1% Unterschied für 11°).

Fig. 42 bis 44. Wassermanometer von Lux.

Gelegentlich wird die Messung mit Quecksilbersäule zu ungenau, die mit Wassersäule unbequem, weil die messende Wassersäule lang wird. Quecksilber ist zu schwer, Wasser zu leicht, dazwischen aber hat man keine Flüssigkeit, etwa vom spezifischen Gewicht 6 oder 8. In solchen Fällen kann man durch *Anwendung zweier Flüssigkeiten* Abhilfe schaffen und etwa das in dieser Form von Lux angegebene Manometer Fig. 45 verwenden. Tritt Spannung in das Gefäß *A* ein, in dem Quecksilber steht, so hebt sich der Quecksilberspiegel im engen Rohr. Gleichzeitig aber wird auch die Wassersäule vergrößert, weil sich das enge Rohr nach oben hin noch einmal zusammenschnürt. Daher wird die zu messende Spannung teils durch Quecksilber, teils durch Wasser ausgeglichen, und die Skala, die den Wasserstand ablesen läßt, wird weiter als bei Quecksilber, enger als bei Wasser allein. Man stellt sie rechnerisch oder besser empirisch, durch Eichen fest.

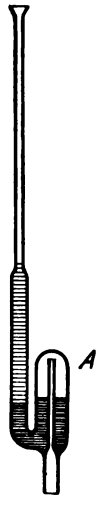


Fig. 45. Wasser-Quecksilber-Manometer von Lux.

27. Messung kleiner Spannungen und kleiner Spannungsunterschiede. Um sehr kleine Spannungsunterschiede zu messen, wie sie als Zug bei einer Feuerungsanlage oder bei Lüftungsanlagen vorkommen, reichen gewöhnliche Instrumente nicht aus. Manometer für sehr kleine Spannungen nennt man meist Zugmesser.

Man verwendet als *Zugmesser* Plattenfederinstrumente mit sehr dünnen und möglichst großen Platten in verschiedenen Anordnungen; auch Flüssigkeitsmanometer in der Dosenform gewöhnlicher Manometer werden verwendet, bei denen die kleinen Bewegungen der Flüssigkeitsspiegel durch Schwimmer auf einen Zeiger übertragen und dabei stark vergrößert werden. Gewöhnliche Wassermanometer lassen nämlich sehr kleine Spannungsunterschiede von wenigen Millimetern Wassersäule nicht mehr genau messen.

Ein anderes Mittel, sie empfindlicher zu machen, ist die *Verwendung zweier Flüssigkeiten* von wenig verschiedenem spezifischen Gewicht. Eine solche Anordnung gibt Fig. 46: der obere Teil ist etwa mit Petroleum gefüllt (wegen anderer Flüssigkeiten siehe später, S. 64). Beim Füllen hat man (in Fig. 46) die Flüssigkeitsspiegel in den Gefäßen *A* und *B* sorgfältig so abzugleichen, daß die Grenze zwischen Petroleum und Wasser beiderseits gleich hoch steht — oder man muß den Anfangsausschlag des Instrumentes als Korrektion berücksichtigen. Außerdem darf man natürlich die kleinen Niveaudifferenzen, die im Betrieb in den Gefäßen *A* und *B* entstehen, nicht vernachlässigen, sie sind bei der geringen zu messenden Spannung wohl von Einfluß. Es liegt auch in der Natur der Sache, daß die Anordnung sehr empfindlich für Abweichungen von der senkrechten Aufhängung ist: kleine Abweichungen bewirken bedeutende Nullpunktsverschiebungen. Diese Schwierigkeiten umgeht man durch Verwendung einer Anordnung nach Fig. 47. Die zu messende Spannungsdifferenz wird oben zugeführt, die Zuleitungen der Drucke p_1 und p_2, deren Unterschied zu messen ist, sind durch die Dreiwegehähne absperrbar, und es ist dafür Anschluß an die Außenluft möglich. Man öffnet zunächst Hahn *a*, schließt ihn, nachdem die zu messende Spannungsdifferenz einen Ausschlag bewirkt hat; verbindet oben mit der Außenluft und öffnet Hahn *b*, schließt ihn wieder, nachdem die Spiegel in den großen Gefäßen sich ausgeglichen haben. Nachdem wieder die Spannungsdifferenz oben angeschlossen ist, öffnet man kurze Zeit Hahn *a*, und so fort, bis man keine Veränderungen mehr wahrnimmt: dann steht in den weiten Gefäßen der Spiegel gleich, während die Scheide zwischen den Flüssigkeiten die Spannung anzeigt. Nie darf Hahn *a* und *b* zugleich offen sein.

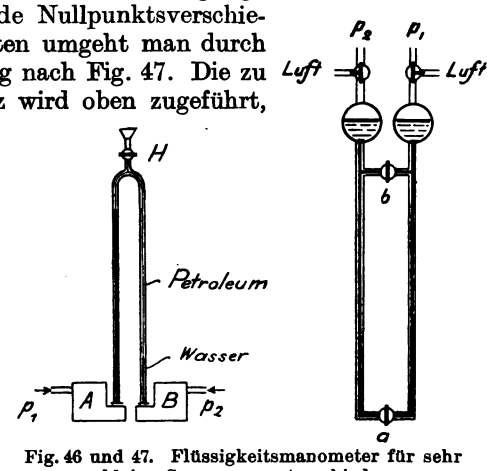


Fig. 46 und 47. Flüssigkeitsmanometer für sehr kleine Spannungsunterschiede.

Es ist angenehm, den Vorrat aus Wasser bestehen zu lassen, das wenig verdunstet; hieraus, und bei Messung von Spannungen in Wasser auch aus der Natur der Sache, ergibt sich, daß in Fig. 46 eine Flüssigkeit leichter als Wasser, in Fig. 47 eine solche schwerer als Wasser verwendet werden muß. Aus dem Unterschied des spezifischen Gewichtes derselben gegen 1 bestimmt sich die Empfindlichkeit der Anordnung. Bei zu großer Empfindlichkeit wird die Langsamkeit der Einstellung bald störend. Die verwendete Flüssigkeit darf sich mit Wasser gar nicht mischen; die scharfe Trennung der Flüssigkeiten voneinander hängt von ihren Oberflächeneigenschaften ab, die z. B. für Wasser sehr ungünstig sind (Tabelle auf S. 64), jedoch durch einen sehr kleinen Zusatz von Ätzkali verbessert werden. Als zweite

Flüssigkeiten kommen neben dem unsauberen Petroleum folgende in Frage (vergleiche die Tabelle auf S. 64): Toluol ist sauberer als Petroleum, außerdem chemisch definiert und wird daher nicht im spezifischen Gewicht durch Verdunstung beeinflußt; sehr geeignet ist Chloroform, das sich durch etwas in Wasser ganz unlöslichen Indigo blau färben läßt. Mischungen von Benzol ($d_4^{20} = 0{,}88$) und Nitrobenzol ($d_4^{20} = 1{,}21$) lassen sich in jedem beliebigen zwischenliegenden spezifischen Gewicht herstellen. — Diese Methode ist nicht zu verwechseln mit der bei Fig. 45 besprochenen: dort kam das Verhältnis, hier die Differenz der spezifischen Gewichte zur Wirkung.

Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit von Flüssigkeitsmanometern zu steigern, ist es, dem Rohr und der Skala eine Neigung zu geben. In dem Zugmesser, Fig. 48, läuft das Wasser unter dem Einfluß eines kleinen Druckes je nach der Neigung des Rohres und je nach dem Verhältnis der Rohrweite zur Weite des Gefäßes um Strecken vorwärts, die

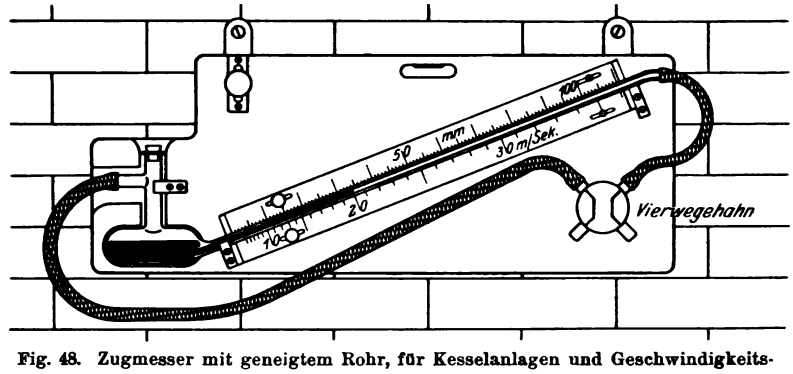


Fig. 48. Zugmesser mit geneigtem Rohr, für Kesselanlagen und Geschwindigkeitsmessung.

als Abstand der Skalenstriche ein Mehrfaches des Millimeters ergeben. Das Instrument ist mit einer Wasserwage versehen; die zweite Skala dient der Geschwindigkeitsmessung mittels Staugerät, § 42. — Geht man dabei mit der Neigung weiter als 1 zu 5 bis 10, so erzielt man nicht ohne weiteres genauere Ergebnisse: mangelhafte Geradheit des Rohres, Hängen des Wassers an der Wandung und ungenau wagerechte Aufstellung machen sich dann bald störend bemerkbar. Das Hängen des Wassers insbesondere — die mangelnde Netzung — läßt sich beheben durch Verwendung von Alkohol, der aber verdunstet, oder durch Zusatz von ganz wenig Kalilauge oder Seife, wodurch die Oberflächenerscheinungen durchaus geändert werden; es braucht nur so wenig zugesetzt zu werden, daß die Änderung des spezifischen Gewichtes unwesentlich bleibt.

Bei sorgfältiger Beachtung der genannten Schwierigkeiten durch passende Ausführung und Eichung des Instrumentes kann man jedoch bis zu Neigungen 1 : 100, ja 1 : 1000 gehen, wie bei dem *Recknagelschen Mikromanometer*. Dieses in der Lüftungstechnik viel benutzte

Instrument ist in Fig. 49 dargestellt: Ein geschlossenes Gefäß von bekanntem, lichtem Durchmesser (meist 100 mm) schließt an ein Rohr mit Skala an, dessen Neigung verändert werden kann oder auch unveränderlich ist. Ein Umstellhahn gestattet, die beiden Seiten des Instrumentes gleichzeitig mit der Atmosphäre zu verbinden, um den Nullpunkt zu bestimmen, oder beide gleichzeitig mit den Meßstellen zu verbinden, zwischen denen dann ein Druckunterschied Δp aus der Bewegung des Flüssigkeitsfadens abgelesen wird. Bei der Benutzung hat man das Instrument zunächst mittels der beiden Wasserwagen und der drei Stellschrauben auszurichten, und muß dann, namentlich wenn man die Neigung des Rohres verändert hatte, den Wert eines Teilstriches der Skala feststellen — das Instrument eichen. Das geschieht, indem man eine sorgfältig abgemessene Menge Flüssig-

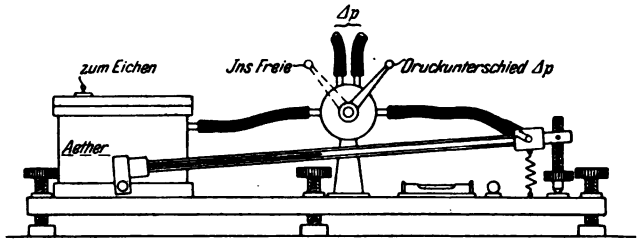


Fig. 49. Recknagelsches Differentialmanometer (Mikromanometer).

keit durch die Einfüllöffnung in das Gefäß zu dem schon vorhandenen Inhalt hinzutut und beobachtet, wie weit der Faden im Rohr vorwärtsläuft.

Wir bezeichnen mit F den Querschnitt des Gefäßes, mit f den Querschnitt des um einen Winkel α gegen die Horizontale geneigten Rohres. Dann entsteht ein senkrecht gemessener Höhenunterschied h der Spiegel in beiden Teilen aus dem Anstieg h_1 im Rohr und dem Abfall h_2 im Gefäß:

$$h = h_1 + h_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Faden habe sich nun um n mm vorwärts bewegt. Dann ist das ins Rohr eingetretene Flüssigkeitsvolumen $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f$ gleich dem aus dem Gefäß entnommenen $F \cdot h_2$, es ist also $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f = F \cdot h_2$. Die hieraus für h_1 und h_2 folgenden Werte, in (1) eingesetzt, ergibt:

$$h = n \cdot \left(\sin\alpha + \frac{f}{F}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

als diejenige Druckänderung (gemessen in den Einheiten wie h, also gegebenenfalls in mm Toluolsäule od. dgl.), die zur Bewegung n des Fa-

Flüssigkeiten kommen neben dem unsauberen Petroleum folgende in Frage (vergleiche die Tabelle auf S. 64): Toluol ist sauberer als Petroleum, außerdem chemisch definiert und wird daher nicht im spezifischen Gewicht durch Verdunstung beeinflußt; sehr geeignet ist Chloroform, das sich durch etwas in Wasser ganz unlöslichen Indigo blau färben läßt. Mischungen von Benzol ($d_4^{20} = 0{,}88$) und Nitrobenzol ($d_4^{20} = 1{,}21$) lassen sich in jedem beliebigen zwischenliegenden spezifischen Gewicht herstellen. — Diese Methode ist nicht zu verwechseln mit der bei Fig. 45 besprochenen: dort kam das Verhältnis, hier die Differenz der spezifischen Gewichte zur Wirkung.

Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit von Flüssigkeitsmanometern zu steigern, ist es, dem Rohr und der Skala eine Neigung zu geben. In dem Zugmesser, Fig. 48, läuft das Wasser unter dem Einfluß eines kleinen Druckes je nach der Neigung des Rohres und je nach dem Verhältnis der Rohrweite zur Weite des Gefäßes um Strecken vorwärts, die

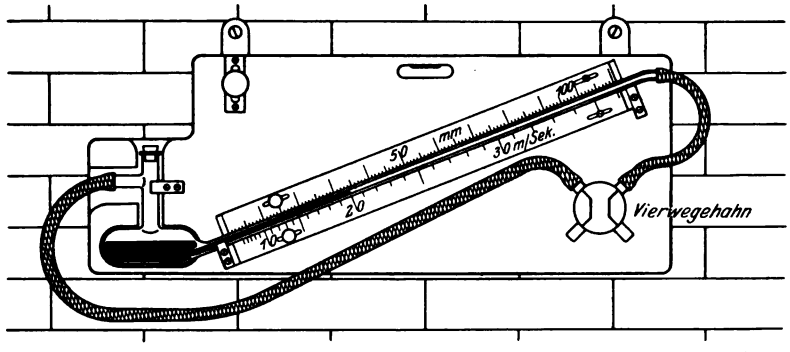


Fig. 48. Zugmesser mit geneigtem Rohr, für Kesselanlagen und Geschwindigkeitsmessung.

als Abstand der Skalenstriche ein Mehrfaches des Millimeters ergeben. Das Instrument ist mit einer Wasserwage versehen; die zweite Skala dient der Geschwindigkeitsmessung mittels Staugerät, § 42. — Geht man dabei mit der Neigung weiter als 1 zu 5 bis 10, so erzielt man nicht ohne weiteres genauere Ergebnisse: mangelhafte Geradheit des Rohres, Hängen des Wassers an der Wandung und ungenau wagerechte Aufstellung machen sich dann bald störend bemerkbar. Das Hängen des Wassers insbesondere — die mangelnde Netzung — läßt sich beheben durch Verwendung von Alkohol, der aber verdunstet, oder durch Zusatz von ganz wenig Kalilauge oder Seife, wodurch die Oberflächenerscheinungen durchaus geändert werden; es braucht nur so wenig zugesetzt zu werden, daß die Änderung des spezifischen Gewichtes unwesentlich bleibt.

Bei sorgfältiger Beachtung der genannten Schwierigkeiten durch passende Ausführung und Eichung des Instrumentes kann man jedoch bis zu Neigungen 1 : 100, ja 1 : 1000 gehen, wie bei dem *Recknagelschen Mikromanometer*. Dieses in der Lüftungstechnik viel benutzte

Instrument ist in Fig. 49 dargestellt: Ein geschlossenes Gefäß von bekanntem, lichtem Durchmesser (meist 100 mm) schließt an ein Rohr mit Skala an, dessen Neigung verändert werden kann oder auch unveränderlich ist. Ein Umstellhahn gestattet, die beiden Seiten des Instrumentes gleichzeitig mit der Atmosphäre zu verbinden, um den Nullpunkt zu bestimmen, oder beide gleichzeitig mit den Meßstellen zu verbinden, zwischen denen dann ein Druckunterschied Δp aus der Bewegung des Flüssigkeitsfadens abgelesen wird. Bei der Benutzung hat man das Instrument zunächst mittels der beiden Wasserwagen und der drei Stellschrauben auszurichten, und muß dann, namentlich wenn man die Neigung des Rohres verändert hatte, den Wert eines Teilstriches der Skala feststellen — das Instrument eichen. Das geschieht, indem man eine sorgfältig abgemessene Menge Flüssig-

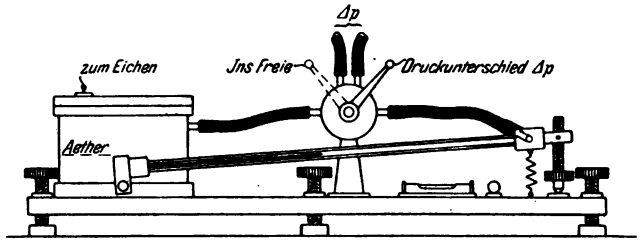


Fig. 49. Recknagelsches Differentialmanometer (Mikromanometer).

keit durch die Einfüllöffnung in das Gefäß zu dem schon vorhandenen Inhalt hinzutut und beobachtet, wie weit der Faden im Rohr vorwärtsläuft.

Wir bezeichnen mit F den Querschnitt des Gefäßes, mit f den Querschnitt des um einen Winkel α gegen die Horizontale geneigten Rohres. Dann entsteht ein senkrecht gemessener Höhenunterschied h der Spiegel in beiden Teilen aus dem Anstieg h_1 im Rohr und dem Abfall h_2 im Gefäß:

$$h = h_1 + h_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Faden habe sich nun um n mm vorwärts bewegt. Dann ist das ins Rohr eingetretene Flüssigkeitsvolumen $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f$ gleich dem aus dem Gefäß entnommenen $F \cdot h_2$, es ist also $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f = F \cdot h_2$. Die hieraus für h_1 und h_2 folgenden Werte, in (1) eingesetzt, ergibt:

$$h = n \cdot \left(\sin\alpha + \frac{f}{F}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

als diejenige Druckänderung (gemessen in den Einheiten wie h, also gegebenenfalls in mm Toluolsäule od. dgl.), die zur Bewegung n des Fa-

Flüssigkeiten kommen neben dem unsauberen Petroleum folgende in Frage (vergleiche die Tabelle auf S. 64): Toluol ist sauberer als Petroleum, außerdem chemisch definiert und wird daher nicht im spezifischen Gewicht durch Verdunstung beeinflußt; sehr geeignet ist Chloroform, das sich durch etwas in Wasser ganz unlöslichen Indigo blau färben läßt. Mischungen von Benzol ($d_4^{20} = 0{,}88$) und Nitrobenzol ($d_4^{20} = 1{,}21$) lassen sich in jedem beliebigen zwischenliegenden spezifischen Gewicht herstellen. — Diese Methode ist nicht zu verwechseln mit der bei Fig. 45 besprochenen: dort kam das Verhältnis, hier die Differenz der spezifischen Gewichte zur Wirkung.

Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit von Flüssigkeitsmanometern zu steigern, ist es, dem Rohr und der Skala eine Neigung zu geben. In dem Zugmesser, Fig. 48, läuft das Wasser unter dem Einfluß eines kleinen Druckes je nach der Neigung des Rohres und je nach dem Verhältnis der Rohrweite zur Weite des Gefäßes um Strecken vorwärts, die

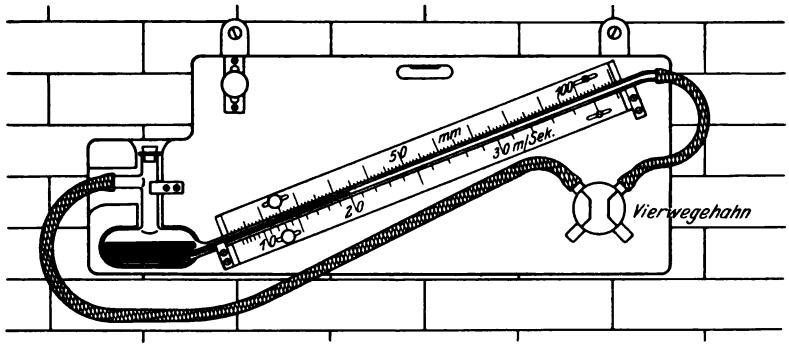


Fig. 48. Zugmesser mit geneigtem Rohr, für Kesselanlagen und Geschwindigkeitsmessung.

als Abstand der Skalenstriche ein Mehrfaches des Millimeters ergeben. Das Instrument ist mit einer Wasserwage versehen; die zweite Skala dient der Geschwindigkeitsmessung mittels Staugerät, § 42. — Geht man dabei mit der Neigung weiter als 1 zu 5 bis 10, so erzielt man nicht ohne weiteres genauere Ergebnisse: mangelhafte Geradheit des Rohres, Hängen des Wassers an der Wandung und ungenau wagerechte Aufstellung machen sich dann bald störend bemerkbar. Das Hängen des Wassers insbesondere — die mangelnde Netzung — läßt sich beheben durch Verwendung von Alkohol, der aber verdunstet, oder durch Zusatz von ganz wenig Kalilauge oder Seife, wodurch die Oberflächenerscheinungen durchaus geändert werden; es braucht nur so wenig zugesetzt zu werden, daß die Änderung des spezifischen Gewichtes unwesentlich bleibt.

Bei sorgfältiger Beachtung der genannten Schwierigkeiten durch passende Ausführung und Eichung des Instrumentes kann man jedoch bis zu Neigungen 1 : 100, ja 1 : 1000 gehen, wie bei dem *Recknagelschen Mikromanometer*. Dieses in der Lüftungstechnik viel benutzte

Instrument ist in Fig. 49 dargestellt: Ein geschlossenes Gefäß von bekanntem, lichtem Durchmesser (meist 100 mm) schließt an ein Rohr mit Skala an, dessen Neigung verändert werden kann oder auch unveränderlich ist. Ein Umstellhahn gestattet, die beiden Seiten des Instrumentes gleichzeitig mit der Atmosphäre zu verbinden, um den Nullpunkt zu bestimmen, oder beide gleichzeitig mit den Meßstellen zu verbinden, zwischen denen dann ein Druckunterschied Δp aus der Bewegung des Flüssigkeitsfadens abgelesen wird. Bei der Benutzung hat man das Instrument zunächst mittels der beiden Wasserwagen und der drei Stellschrauben auszurichten, und muß dann, namentlich wenn man die Neigung des Rohres verändert hatte, den Wert eines Teilstriches der Skala feststellen — das Instrument eichen. Das geschieht, indem man eine sorgfältig abgemessene Menge Flüssig-

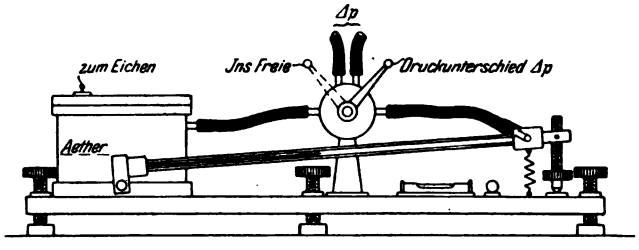


Fig. 49. Recknagelsches Differentialmanometer (Mikromanometer).

keit durch die Einfüllöffnung in das Gefäß zu dem schon vorhandenen Inhalt hinzutut und beobachtet, wie weit der Faden im Rohr vorwärtsläuft.

Wir bezeichnen mit F den Querschnitt des Gefäßes, mit f den Querschnitt des um einen Winkel α gegen die Horizontale geneigten Rohres. Dann entsteht ein senkrecht gemessener Höhenunterschied h der Spiegel in beiden Teilen aus dem Anstieg h_1 im Rohr und dem Abfall h_2 im Gefäß:

$$h = h_1 + h_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Faden habe sich nun um n mm vorwärts bewegt. Dann ist das ins Rohr eingetretene Flüssigkeitsvolumen $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f$ gleich dem aus dem Gefäß entnommenen $F \cdot h_2$, es ist also $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f = F \cdot h_2$. Die hieraus für h_1 und h_2 folgenden Werte, in (1) eingesetzt, ergibt:

$$h = n \cdot \left(\sin\alpha + \frac{f}{F}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

als diejenige Druckänderung (gemessen in den Einheiten wie h, also gegebenenfalls in mm Toluolsäule od. dgl.), die zur Bewegung n des Fa-

Flüssigkeiten kommen neben dem unsauberen Petroleum folgende in Frage (vergleiche die Tabelle auf S. 64): Toluol ist sauberer als Petroleum, außerdem chemisch definiert und wird daher nicht im spezifischen Gewicht durch Verdunstung beeinflußt; sehr geeignet ist Chloroform, das sich durch etwas in Wasser ganz unlöslichen Indigo blau färben läßt. Mischungen von Benzol ($d_4^{20} = 0{,}88$) und Nitrobenzol ($d_4^{20} = 1{,}21$) lassen sich in jedem beliebigen zwischenliegenden spezifischen Gewicht herstellen. — Diese Methode ist nicht zu verwechseln mit der bei Fig. 45 besprochenen: dort kam das Verhältnis, hier die Differenz der spezifischen Gewichte zur Wirkung.

Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit von Flüssigkeitsmanometern zu steigern, ist es, dem Rohr und der Skala eine Neigung zu geben. In dem Zugmesser, Fig. 48, läuft das Wasser unter dem Einfluß eines kleinen Druckes je nach der Neigung des Rohres und je nach dem Verhältnis der Rohrweite zur Weite des Gefäßes um Strecken vorwärts, die

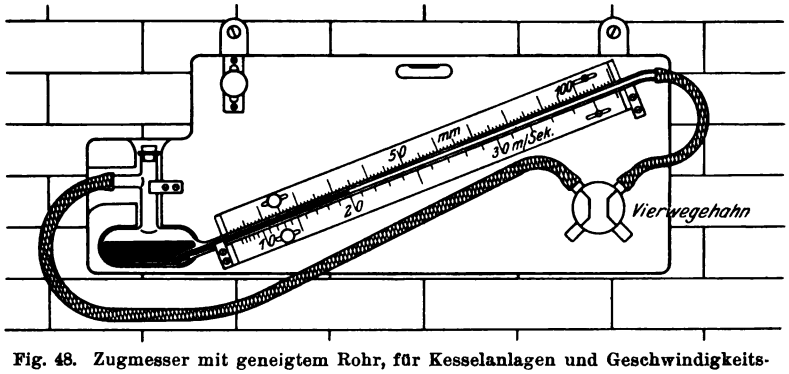


Fig. 48. Zugmesser mit geneigtem Rohr, für Kesselanlagen und Geschwindigkeitsmessung.

als Abstand der Skalenstriche ein Mehrfaches des Millimeters ergeben. Das Instrument ist mit einer Wasserwage versehen; die zweite Skala dient der Geschwindigkeitsmessung mittels Staugerät, § 42. — Geht man dabei mit der Neigung weiter als 1 zu 5 bis 10, so erzielt man nicht ohne weiteres genauere Ergebnisse: mangelhafte Geradheit des Rohres, Hängen des Wassers an der Wandung und ungenau wagerechte Aufstellung machen sich dann bald störend bemerkbar. Das Hängen des Wassers insbesondere — die mangelnde Netzung — läßt sich beheben durch Verwendung von Alkohol, der aber verdunstet, oder durch Zusatz von ganz wenig Kalilauge oder Seife, wodurch die Oberflächenerscheinungen durchaus geändert werden; es braucht nur so wenig zugesetzt zu werden, daß die Änderung des spezifischen Gewichtes unwesentlich bleibt.

Bei sorgfältiger Beachtung der genannten Schwierigkeiten durch passende Ausführung und Eichung des Instrumentes kann man jedoch bis zu Neigungen 1 : 100, ja 1 : 1000 gehen, wie bei dem *Recknagelschen Mikromanometer*. Dieses in der Lüftungstechnik viel benutzte

Instrument ist in Fig. 49 dargestellt: Ein geschlossenes Gefäß von bekanntem, lichtem Durchmesser (meist 100 mm) schließt an ein Rohr mit Skala an, dessen Neigung verändert werden kann oder auch unveränderlich ist. Ein Umstellhahn gestattet, die beiden Seiten des Instrumentes gleichzeitig mit der Atmosphäre zu verbinden, um den Nullpunkt zu bestimmen, oder beide gleichzeitig mit den Meßstellen zu verbinden, zwischen denen dann ein Druckunterschied Δp aus der Bewegung des Flüssigkeitsfadens abgelesen wird. Bei der Benutzung hat man das Instrument zunächst mittels der beiden Wasserwagen und der drei Stellschrauben auszurichten, und muß dann, namentlich wenn man die Neigung des Rohres verändert hatte, den Wert eines Teilstriches der Skala feststellen — das Instrument eichen. Das geschieht, indem man eine sorgfältig abgemessene Menge Flüssig-

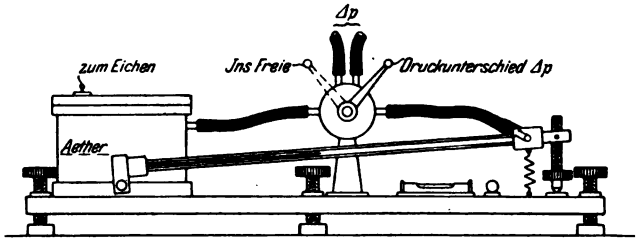


Fig. 49. Recknagelsches Differentialmanometer (Mikromanometer).

keit durch die Einfüllöffnung in das Gefäß zu dem schon vorhandenen Inhalt hinzutut und beobachtet, wie weit der Faden im Rohr vorwärtsläuft.

Wir bezeichnen mit F den Querschnitt des Gefäßes, mit f den Querschnitt des um einen Winkel α gegen die Horizontale geneigten Rohres. Dann entsteht ein senkrecht gemessener Höhenunterschied h der Spiegel in beiden Teilen aus dem Anstieg h_1 im Rohr und dem Abfall h_2 im Gefäß:

$$h = h_1 + h_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Faden habe sich nun um n mm vorwärts bewegt. Dann ist das ins Rohr eingetretene Flüssigkeitsvolumen $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f$ gleich dem aus dem Gefäß entnommenen $F \cdot h_2$, es ist also $n \cdot f = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot f = F \cdot h_2$. Die hieraus für h_1 und h_2 folgenden Werte, in (1) eingesetzt, ergibt:

$$h = n \cdot \left(\sin\alpha + \frac{f}{F}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

als diejenige Druckänderung (gemessen in den Einheiten wie h, also gegebenenfalls in mm Toluolsäule od. dgl.), die zur Bewegung n des Fa-

dens erforderlich ist. Die Vergrößerung des Ausschlages durch Anwendung der Neigung ist durch den Bruch $\frac{n}{h}$ gegeben:

$$\frac{n}{h} = \frac{1}{\sin\alpha + \frac{f}{F}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Wo man ein Übersetzungsverhältnis $\frac{n}{h}$ erzielen will an einem Instrument vom Querschnittsverhältnis $\frac{f}{F}$, hat man die Neigung zu wählen:

$$\operatorname{tg}\alpha \backsim \sin\alpha = \frac{h}{n} - \frac{f}{F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Bei flachen Neigungen kann man sin und tg miteinander vertauschen. Auf das Übersetzungsverhältnis haben also $\sin\alpha$ und $\frac{f}{F}$ gleichstarken Einfluß, dergestalt, daß das Instrument um so empfindlicher wird — Ausschaltung jeder Reibung vorausgesetzt —, je kleiner man diese beiden Werte hält. Bei empfindlichen Mikromanometern muß das Rohr also möglichst eng sein; hat das Rohr 2 mm Durchmesser, bei 100 mm Gefäßweite, so ist $\frac{f}{F} = \frac{1}{100}$. Wählt man die Rohrneigungen $\operatorname{tg}\alpha = 1 : 100$, so erhält man also nicht 100fache, sondern nur 50fache Vergrößerung des Ausschlages. Um hundertfache Vergrößerung zu erzielen, wäre $\sin\alpha = 0$ zu machen, das Rohr also wagerecht zu legen; das ist bei engen Rohren auch zulässig, ohne daß die Flüssigkeit ausläuft. Bei einer Abwärtsneigung im Betrage $\sin\alpha = -\frac{f}{F}$ würde das Aushebern beginnen.

Formel (3) gilt auch für einfache U-Rohre, $\sin\alpha = 1$. Beim einfachen U-Rohr, $f = F$, wird $\frac{n}{h} = \frac{1}{2}$; beim Gefäßmanometer ist die Skala im Verhältnis $\frac{n}{h} = \frac{1}{1 + \frac{f}{F}}$ zu verkürzen.

Beim Mikromanometer ermittelt man meist $\frac{n}{h}$ nicht rechnungsmäßig nach Formel (3), sondern durch eine *Eichung des Mikromanometers*, die sich sehr schnell und so ausführen läßt, daß sich die Bestimmung von $\sin\alpha$ und von $\frac{f}{F}$ praktisch ganz erübrigt. Bei irgendwelchen Beobachtungen sei die Flüssigkeitssäule im Rohr um n Skalenteile vorwärtsgelaufen. Der zugehörige Wert h ist zu ermitteln. Er wird sein:

$$h = n\left(\sin\alpha + \frac{f}{F}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Wir fügen, während das Instrument beiderseits an Luft angeschlossen ist (Wechselhahn, Fig. 49), das Volumen V_0 von der gleichen Flüssigkeit

zu dem schon vorhandenen Inhalt hinzu, und beobachten die Anzahl Skalenteile n_0, um die der Flüssigkeitsfaden dabei voranläuft. Es wird sein:

$$V_0 = f \cdot n_0 + F \cdot h_0 ,$$

wenn h_0 die (unbekannte) Niveauhebung im Gefäß ist. Senkrecht gemessen, steigt das Niveau im Gefäß und Rohr gleichviel:

$$h_0 = n_0 \cdot \sin\alpha ;$$

also ist:

$$V_0 = f \cdot n_0 + F \cdot n_0 \cdot \sin\alpha$$

$$\frac{V_0}{F} = n_0 \left(\frac{f}{F} + \sin\alpha \right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Aus dem Vergleich von (2) und (5) folgt:

$$h = n \cdot \frac{V_0}{F \cdot n_0} \text{ mm Flüss.} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Ist γ das spezifische Gewicht der verwendeten Flüssigkeit in kg/cbm, so kann man auch schreiben:

$$h = n \cdot \frac{V_0 \cdot \gamma}{F \cdot n_0} = n \cdot \frac{G_0}{F \cdot n_0} \frac{\text{kg}}{\text{qm}} \text{ oder mm WS} \quad \ldots\ldots \quad (6a)$$

wenn G_0 das bei der Eichung eingefüllte Gewicht bedeutet. Alle Größen sind in den Einheiten des technischen Maßsystems, also in kg, qm, cbm anzunehmen. Doch kann man, da nur das Verhältnis $\frac{n}{n_0}$ in Frage kommt, unter n und n_0 auch die Fadenlänge in beliebigen Skalenteilen verstehen. Wenn man aber meist die Einheiten wie folgt annehmen wird: V_0 in ccm, γ als Relativgewicht bezogen auf Wasser von 4°, G_0 in g, F in qcm, so hätte man die Formeln zu schreiben:

$$h = n \cdot \frac{10 \cdot V_0 \cdot \gamma}{F \cdot n_0} = n \cdot \frac{10 \cdot G_0}{F \cdot n_0} \frac{\text{kg}}{\text{qm}} \text{ oder mm WS} \quad \ldots \quad (6b)$$

Bei mangelhafter Geradheit und wechselndem Kaliber des Rohres muß die Eichung in kleinen Intervallen oder gerade über den Teil der Skala hin vorgenommen werden, der bei der Messung gilt. Achtsam hat man namentlich zu sein, wenn bei der Messung nicht gerade die Nullage des Fadens mit dem Nullpunkt der Skala zusammenfällt; man beachte das in § 10 am Schluß Gesagte.

Über die Eignung verschiedener Flüssigkeiten für die Verwendung im Mikromanometer ist folgendes, zu bemerken: Man verwendet Petroleum, Alkohol, Äther, auch wohl Toluol und Xylol. Petroleum, früher meist verwendet, hat den Nachteil der Unsauberkeit und den weiteren, daß es nicht gleichmäßig verdunstet: durch Verdunsten der leichteren Bestandteile kann das spezifische Gewicht merklich zunehmen. Für Alkohol gilt letzteres auch, infolge von Wasseraufnahme. Insofern sind die übrigen, chemisch definierten und gegen Luft und Wasserdampf indifferenten Flüssigkeiten besser. Erwünscht ist geringe Zähigkeit, um die Einstellung zu beschleunigen, geringe Kapillaritätskonstante, um die Unabhängigkeit von der Netzung zu sichern, geringe Temperaturausdehnung. Einige Zahlenangaben in dieser Hinsicht sind folgende:

	Wasser H_2O	Petroleum —	Alkohol C_2H_6O+aq	Äther $C_4H_{10}O$	Toluol $C_6H_5CH_3$	Benzol C_6H_6	Nitrobenzol $C_6H_5O_2N$	Chloroform $CHCl_3$
Kapillaritätskonstante $a^2 = r \cdot h$	14,8	6,6	5,8	4,8	6,7	6,7	7,3	3,7
Spezifische Zähigkeit bei 20°, Wasser = 100	100	—	—	14	33	36	114	32
Wärmeausdehnungszahl $\times 1000$, wahre bei 20°	0,18	0,95	1,0	1,65	1,1	1,25	0,84	1,27
Spezifisches Gewicht bei 20°, Wasser von 4° = 1	0,998	$\sim$ 0,85	$\sim$ 0,80	0,705	0,864	0,880	1,206	1,501
Gewicht des Dampfes, Luft = 1, annähernd	0,62	—	1,5	2,6	4	2,6	—	5
Dampfdruck bei 20° in mm QuS	17	—	44	432	20	74	< 1	160

Trotz sonst guter Eigenschaften scheidet Wasser wegen seiner Zähigkeit aus. Sehr gut bewährt hat sich Toluol, für das ein billiger Ausgleich zwischen den Anforderungen besteht.

Das Arbeiten mit empfindlichen Differentialmanometern erfordert viel Vorsicht; Empfindlichkeit eines Instrumentes hinsichtlich der Ablesung hat stets auch Empfindlichkeit gegen Störungen im Gefolge. Insbesondere beachte man: das spezifische Gewicht der Füllungen ist von der Temperatur abhängig; ungleiches Gewicht der in den beiden Zuleitungen zum Instrument stehenden Luft bewirkt Störungen, wenn die Zuleitungen senkrecht laufen, man vermeide also senkrechten Verlauf, oder wo er nicht vermieden werden kann, sorge man für gleiche Temperatur beider Rohre, indem man sie dicht zusammenlegt; Gummischläuche vermeide man, weil sie die Wärme schlecht leiten und weil sie, wenn früher zu Leuchtgas oder dergleichen benutzt, die Luft im Innern verändern; Kupferrohr ist besser.

28. Differentialmanometer. Jedes Manometer mißt den Unterschied des Druckes zu den beiden Seiten seines Meßorgans. Meist aber herrscht auf der einen Seite Atmosphärendruck. Den Unterschied des Druckes zweier Räume findet man am einfachsten als den Unterschied in der Angabe zweier Manometer — der Atmosphärendruck fällt heraus.

Als Differentialmanometer bezeichnet man diejenigen Anordnungen, bei denen der Druckunterschied zweier Räume gegeneinander direkt gemessen werden soll. Die Flüssigkeitsmanometer der meisten Bauarten können ohne weiteres als Differentialmanometer dienen.

Für größere Druckunterschiede hat man auch Federmanometer als Differentialmanometer ausgebildet, Fig. 50. Die Figur zeigt auch die für alle Arten von Federmanometern und für andere Instrumente mit runder Skala übliche Befestigung des Glases mittels Distanzringes und Überziehreifens. Das Instrument ist ein Plattenfedermanometer.

Eine gewisse Schwierigkeit bei der Anwendung von Differentialmanometern besteht darin, wie das Meßorgan vor Überlastungen zu schützen sei. Sperrt man das Manometer von den Räumen ab, deren

Spannung zu messen ist, so darf nicht vorübergehend auf einer Seite des Meßorgans der volle Druck des einen Raumes lasten, während die andere schon von Druck entlastet ist. Sonst wird die Plattenfeder verbogen, bei Quecksilbermanometern das Quecksilber in den Raum niederen Druckes getrieben. In Fig. 50 sind deshalb die beiden Absperrhähne zwangläufig miteinander verbunden. Eine Ausgleichleitung kann nach erfolgter Absperrung geöffnet werden. Sind die beiden Absperrhähne geschlossen, so könnte durch Temperaturerhöhung Druck in dem vollständig geschlossenen Gehäuse entstehen. Deshalb wird einer der Hähne als Dreiwegehahn mit kleiner Nebenbohrung ausgeführt (ebenso beim Mikromanometer, Fig. 49).

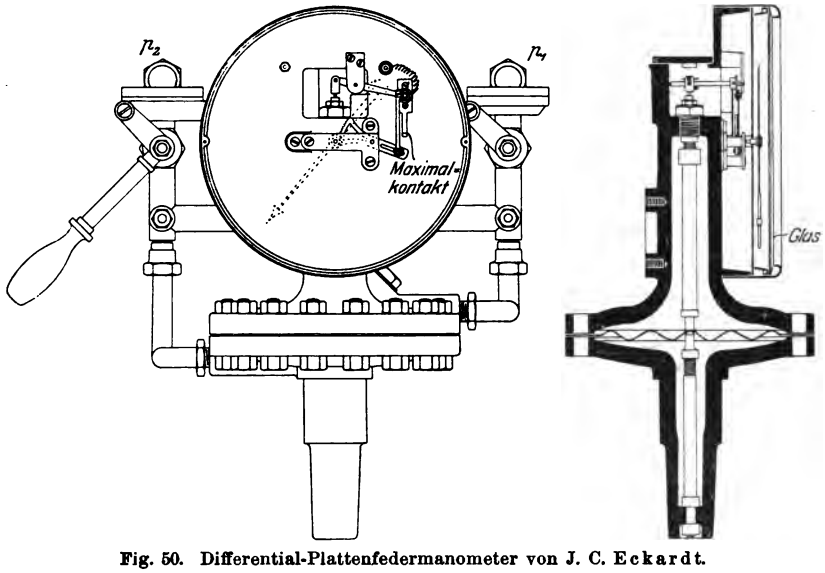


Fig. 50. Differential-Plattenfedermanometer von J. C. Eckardt.

Das Differentialmanometer Fig. 50 wird als „Dampfzeiger" in Verbindung mit dem Düsenmesser, Fig. 148, S. 195, zur Angabe des augenblicklichen Dampfdurchganges benutzt. Bei Druckwasserheizungen bedient man sich der Differentialmanometer zur Anzeige der umlaufenden Wassermengen.

29. Eichung von Manometern. Der Eichung bedürfen eigentlich nur die Federmanometer mit ihrer rein empirischen Teilung und ihrer, mannigfachen Veränderungen ausgesetzten Feder. Bei Flüssigkeitsmanometern bedarf nur die Längenteilung der Skala einer Nachprüfung, vorausgesetzt, daß man die spezifischen Gewichte kennt, wie es ja namentlich für Quecksilber und Wasser ohne weiteres sehr genau der Fall ist. Bei einschenkligen Instrumenten muß man die Richtigkeit der Skala unter Beachtung der Querschnittsverhältnisse feststellen. Die Eichung der Differentialmanometer mit geneigter Skala besprachen wir schon soeben. Jedenfalls sind die Flüssigkeitsmanometer in sich justierbar,

während die Federmanometer des Vergleichs mit einem Normalinstrument bedürfen.

Als Normalinstrumente können Flüssigkeitsmanometer dienen, nachdem dieselben in sich nachgeprüft sind; Zugmesser kann man etwa mit einem Recknagelschen Differentialmanometer vergleichen; für Vakuummeter und für Druckmanometer benutzt man ein Quecksilbermanometer als Normalinstrument, bei höheren Spannungen etwa in der durch Fig. 41 erläuterten Form mit Fernrohrablesung.

Außerdem hat man als für höhere Spannungen bequemeres Instrument das *Kolbenmanometer* oder die *Kolbenpresse* zur Verfügung (Fig. 51). Ein Kolben von bekanntem Querschnitt wird mit Gewichtsstücken von bekanntem Gewicht belastet; dadurch entsteht in der Flüssigkeit unter dem Kolben — Öl oder Glyzerin — eine Spannung, die durch die beiden bekannten Größen direkt gegeben ist. Hat der Kolben 2 cm Durchmesser, also 3,14 qcm Querschnitt, so muß jedes Gewichtsstück 3,14 kg wiegen, wenn die Abstufung des Druckes von Atmosphäre zu Atmosphäre erfolgen soll. Das Gewicht des Kolbens ist, nötigenfalls unter Beigabe eines Beilagegewichtes, so abgepaßt, daß es die erste Atmosphäre einstellt. Man kann nun einen Indikator oder bei *M* ein Manometer aufsetzen und diese eichen. Durch Auflegen der Gewichte wird also die betreffende Spannung sowohl erzeugt als auch gemessen. Um die Reibung des Kolbens in seiner Führung unschädlich zu machen, bringt man die Gewichte zur Drehung. Der Kolben hat 2 cm, nur bei hohen Spannungen kleineren Durchmesser; infolgedessen sind bedeutende Gewichte aufzulegen, die dann infolge ihrer Masse längere Zeit in Rotation bleiben. — Die Kolbenpresse ist von Schaeffer & Budenberg dadurch wesentlich verbessert und insbesondere für viel höhere Spannungen brauchbar gemacht, daß ein Differentialkolben verwendet wird, der nach unten durchgeht und mit daran hängenden Gewichten belastet wird. Die wirksame Kolbenfläche eines Kolbenmanometers stellt man am sichersten fest, indem man es bei einer möglichst hohen Spannung mit einem Quecksilberinstrument vergleicht.

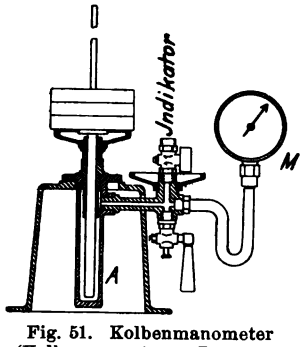


Fig. 51. Kolbenmanometer (Kolbenpresse) von Dreyer, Rosenkranz & Droop.

Mit zunehmender Spannung sinkt der Kolben mehr und mehr ein, weil so viel Flüssigkeit aus dem Zylinder in Indikator und Manometer übertritt, wie nötig ist, um den Raum unter dem Indikatorkolben, den Raum in der sich dehnenden Manometerfeder auszufüllen; auch muß jeder Verlust infolge von Undichtheit ein Herabsinken des Kolbens veranlassen. Dadurch entsteht zunächst ein Fehler in solchem Betrage, wie der Glyzerinsäule von der Höhe des Einsenkens entspricht; dieser Fehler ist indes nur bei ganz kleinen Spannungen von einiger Bedeutung, für die sich das Kolbenmanometer ohnehin nicht eignet. Außerdem aber kommt es dahin, daß der Kolben unten aufstößt und keine

Messung mehr möglich ist. Beides wird behoben, wenn man eine Glyzerinpumpe mit dem Zylinder in Verbindung bringt und nach Bedarf Glyzerin nachpreßt, so daß der Kolben bei allen Spannungen in gleicher Höhe bleibt.

Für kleine Spannungen ist das Kolbenmanometer, außer aus dem schon genannten Grunde, auch wegen der störenden Reibung schlecht zu brauchen; diese stört dann, selbst wenn der Kolben rotiert. Man verwendet es daher nur für große Spannungen, bei denen Quecksilbersäulen ihrer Länge wegen unhandlich werden.

Als Normalinstrument bei der Eichung verwendet man auch wohl *Kontrollmanometer*, das sind selbst Federmanometer bester Bauart, die ihrerseits mit einem Quecksilberinstrument verglichen sind. Die Kontrollmanometer haben zwei völlig voneinander getrennte Werke. Solange die beiden Zeiger übereingehen, hat das Instrument noch nicht Schaden erlitten und ist zuverlässig.

Die einfachste Art, sich von der Unversehrtheit eines Manometers — auch anderer Instrumente — zu überzeugen, ist übrigens die Nullpunktkontrolle: solange ein Instrument bei Außerbetriebsetzung auf Null zurückgeht, so lange ist es nicht ganz in Unordnung. Der Anschlagstift, den die Manometer meist beim Nullpunkt haben, macht diese Kontrolle unmöglich, er sollte deshalb fehlen, oder er sollte ein Stück jenseits des Nullpunktes sein, nur um große Schwingungen hintanzuhalten.

Beim Eichen sollte das Manometer die Lage haben — stehend, hängend oder dergleichen — wie später bei der Benutzung. Einen Unterschied zwischen warmer und kalter Eichung zu machen, wie wir das bei den Indikatoren nötig finden werden, ist bei Manometern überflüssig, da ja die Manometerfeder nie warm werden soll.

30. Anbau der Manometer. Nicht selten hat man an den Ablesungen der Manometer Berichtigungen wegen der Anbringung des Instrumentes zu machen. Das Instrument zeigt die Spannung, die in seine messenden Teile hineintritt, und es bleibt zu erwägen, ob das diejenige ist, die man zu kennen wünscht.

Zur Beobachtung der *Druckhöhe einer Wasserpumpe* pflegt ein Manometer am Druckwindkessel zu sein. Da nun im Wasser der Druck mit der Höhe abnimmt, und zwar um $^1/_{10}$ at für 1 m Höhe, so wird die Angabe des Manometers von der Höhenlage abhängen, in der es angebracht ist. Es zeigt den Druck in seiner eigenen Höhenlage an, wenn es unterhalb des Wasserspiegels im Windkessel angebracht ist; ist es an den Luftraum des Windkessels angeschlossen, so zeigt es den Wasserdruck in Höhe des Wasserspiegels im Windkessel an. Da man die Druckförderhöhe einer Pumpe vom Druckventil an zu rechnen pflegt, so hat man also zu der Ablesung am Manometer den Höhenunterschied vom Druckventil zum Manometer, gegebenenfalls zum Wasserspiegel, zuzuzählen oder bisweilen auch abzuziehen. — Entsprechendes gilt von der Saughöhe, die man bekanntlich auch bis zum Druckventil zu rechnen pflegt. — Wenn man die gesamte *Förderhöhe einer Pumpe* ablesen will, so wird man das Manometer am Saug- und

das am Druckwindkessel beobachten. Es genügt aber nicht, beider Angaben zusammenzuzählen, sondern es ist noch der Unterschied in der Höhenlage beider Manometer, gegebenenfalls aber auch wieder die Höhe bis zum Wasserspiegel, hinzuzuzählen. Diese Berichtigung kann leicht 1,5 m WS betragen und würde also bei 30 m gesamter Förderhöhe 5% ausmachen.

Andererseits ist es doch wieder richtig, die Manometer an den Windkesseln und nicht direkt an der Leitung anzubringen. Wenn in einer Rohrleitung das Wasser strömt, so treten leicht Wirbelungen an einer Druckentnahmestelle ein, die zur Messung eines zu kleinen Druckes führen. Das ist namentlich der Fall, wenn die Kanten der Anbohrung nicht sorgsam von Grat befreit sind. Wo man Drucke in so engen Leitungen entnehmen muß, daß eine Entfernung des Grates nicht möglich ist, da bohre man ganz durch und benutze die ausgehende Öffnung, die innen keinen Grat haben wird.

Die Spannung eines in der Rohrleitung *fließenden Mediums* ist immer schwierig zu messen: die *Entnahme der Spannung* ist die Schwierigkeit, weil an der Entnahmeöffnung Störungen auftreten. So fand Büchner (Z. d. V. D. I. 1904, S. 1101) Unterschiede von $^1/_4$ bis $^1/_3$ at, je nachdem er die Kanten der Entnahmeöffnung abrundete oder nicht; das war allerdings bei den hohen Dampfgeschwindigkeiten (400 m/sek), die in Turbinendüsen auftreten. Die Abrundung wäre also nötig, ist aber meist nicht ausführbar.

Übrigens ergeben sich auch theoretisch verschiedene Werte: in einer Rohrleitung wird, eben weil das Wasser fließt und kinetische Energie enthält, die potentielle Energie, also die Spannung, kleiner als in einem Windkessel gemessen. Der Unterschied ist bei den üblichen Wassergeschwindigkeiten von selten mehr als 2,5 m/sek nur klein, nämlich $h = \frac{w^2}{2g} \leqq \frac{6{,}2}{20} \sim \frac{1}{3}$ m WS. Das ist oft zu vernachlässigen, nötigenfalls aber hat man zu überlegen, ob man die gesamte Energie im Wasser oder nur die reine Spannung messen will. Man kann — nach dem Vorgang der Normen für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren, aufgestellt vom Verein Deutscher Ingenieure und anderen — als *inneren* oder *statischen Druck* die reine Druckspannung bezeichnen, während man dann als *Gesamtdruck* des bewegten Mediums denjenigen bezeichnet, der um die Geschwindigkeitshöhe $h = \frac{w^2}{2g}$ m FlS oder besser um den entsprechenden *dynamischen Druck* $p = \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma$ kg/qm größer ist. Der Gesamtdruck ist ein Maß für den Energieinhalt des bewegten Mediums. In einem Windkessel vor der Leitung würde der Druck — bei gleicher Höhenlage der Manometer — mit dem Gesamtdruck in der Leitung übereinstimmen; in einem Windkessel hinter der Leitung wird man wesentlich nur den inneren Druck messen, den die Leitung dem Windkessel zuführt, — sofern nicht durch konische Erweiterung eine Umsetzung des dynamischen Druckes in statischen er-

reicht wird. Von dem Einfluß der Rohrreibung auf die an verschiedenen Stellen zu messenden Drucke ist hierbei abgesehen.

Die *Ablesung von Dampfspannungen* wird auch leicht gefälscht durch Wassersäulen, die sich in den zu den Manometern führenden Meßleitungen durch Niederschlagen von Dampf bilden, und die die Ablesung am Manometer zu groß oder zu klein werden lassen, je nachdem die Meßleitung zum Manometer hin fällt oder steigt. Man hat entweder dafür zu sorgen, daß solche Wassersäule nicht vorhanden ist, oder man hat ihr durch eine Korrektion Rechnung zu tragen. Sind die Manometer einer Dampfmaschine am gemeinsamen Manometerbrett vereint, so führen Leitungen aus dünnem Kupferrohr dahin, die wohl um 2 m WS = 0,2 at die Ablesung fälschen können. Das ist selbst bei hohen Spannungen zu viel.

Da die Manometerleitung eine kühlende Oberfläche bildet, so wird sich stets Dampf in ihr niederschlagen. Das Kondensat wird in ihr stehen bleiben, wenn sie zum Manometer hin abfällt; im entgegengesetzten Fall bleibt es zweifelhaft, ob alles oder etwas oder kein Wasser zur Dampfleitung zurückläuft. Einfaches Abfallen des Rohres gegen das Manometer hin genügt also, um Klarheit über die Verhältnisse zu schaffen, sobald der Druck längere Zeit konstant war. Eine Druckverminderung hat zur Folge, daß Wasser aus der Meßleitung verdrängt wird, die Leitung bleibt auch dann gefüllt und die Einführung einer Berichtigung möglich. Nach einer Drucksteigerung aber wird ein Teil der Leitung von Wasser entblößt werden. Um doch die Größe der Berichtigung festzulegen, achtet man darauf, daß ein genügend langes Stück der Meßleitung zunächst wagerecht geht; dann hat die Entblößung von Wasser keine Bedeutung; man hat auch dieses wagerechte Stück in Spiralform aufgewickelt, wenn die Raumverhältnisse es wünschenswert machten (Fig. 39). Ein anderes Mittel ist es, an den Anfang der Meßleitung einen kleinen Wasserbehälter zu legen, den man durch eine weite, als Überlauf ausgebildete Rohrleitung mit der Dampfleitung verbindet, während die Meßleitung unter Wasser abzweigt (Fig. 52). Nach dem Anbau wird der Behälter und die Meßleitung mit Wasser gefüllt; in der weiten Überlaufleitung steht niemals Wasser; wegen der Weite des Behälters ist die Senkung des Wasserspiegels selbst bei einer starken Druckzunahme nur klein. — Man hält diese umständlicheren Einrichtungen nur selten bei Messung der Dampfspannung für nötig; sie sind aber erforderlich, wenn man bei Mündungsdampfmessern kleine Druckunterschiede messen will (S. 196).

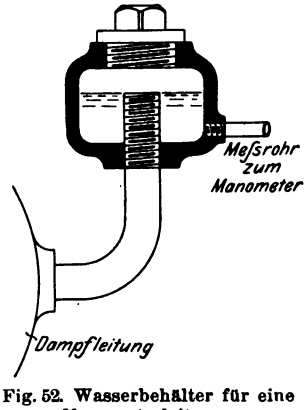


Fig. 52. Wasserbehälter für eine Manometerleitung.

31. Dampfspannung und Temperatur; Barometerstand. Bei gesättigten Dämpfen kann an die Stelle der Spannungsmessung mit Vorteil die Temperaturmessung treten: bei kleinen Spannungen ist

nämlich die Temperaturzunahme groß im Verhältnis zur Spannungszunahme. Auch sind Thermometer besser unveränderlich in ihren Angaben als Manometer. Zu beachten ist, daß ein Thermometer dann absolute Drucke mißt, die Manometer zeigten Überdruck an.

Spannung und Temperatur sind indes nur dann eindeutig voneinander abhängig, wenn es sich um reinen gesättigten Dampf handelt. Haben wir bei Kondensationsanlagen oder am Auspuff einer Kondensationsdampfmaschine ein Luft-Dampf-Gemisch, so ist der Ersatz der Spannungs- durch eine Temperaturmessung nicht immer zulässig.

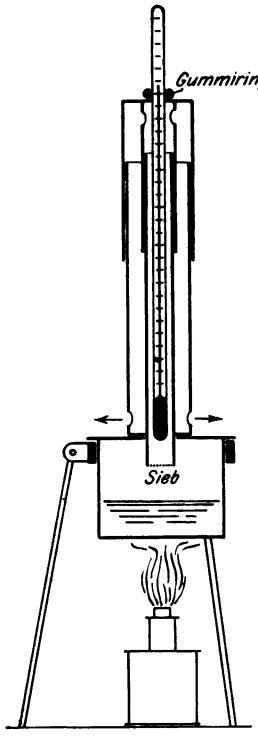


Fig. 53. Siedeapparat von Fueß.

Auch die *Feststellung des Barometerstandes*, die zu jeder Maschinenuntersuchung ordnungsmäßig gehört, ist am sichersten durch Beobachtung des Siedepunktes von Wasserdampf zu machen, zumal auf der Reise, da Quecksilberbarometer schlecht transportabel sind, Aneroide aber durch Stöße ihre Angabe verändern. In der Geodäsie benutzt man den *Siedeapparat* nach Fig. 53: über einer Spirituslampe siedet Wasser; die Dämpfe gehen durch ein Sieb, das Tropfen abfängt, umspülen in einem Rohr ein Thermometer und gehen durch einen Mantel wieder abwärts, um ins Freie zu treten. Das Thermometer ist also in Wasserdampf vom gerade herrschenden Luftdruck und zeigt die Siedetemperatur, oder vielmehr, meist ist die Skala gleich in mm QuS geteilt. Der das Thermometer haltende Gummiring wird so verschoben, daß der Quecksilberfaden nur eben herausguckt; eine Fadenkorrektion fällt dann fort. Die Flamme darf nur mäßig brennen, damit kein nennenswerter Überdruck im Apparat herrscht; das Thermometer muß, wie jedes feine Thermometer, vor dem Ablesen angeklopft werden.

Wenn man, statt ihn zu messen, den Barometerstand aus den Wetterberichten der Zeitungen entnimmt, so hat man zu beachten, daß diese den Stand auf den Meeresspiegel bezogen angeben; bei Versuchen interessiert aber ausschließlich der tatsächliche Barometerstand. Man hätte also die von dem Meteorologen vorgenommene Reduktion auf den Meeresspiegel rückwärts gehend zu beseitigen. Es genügt dazu oft, die Luftsäule von dem betreffenden Druck und der abgelesenen Temperatur sowie von der Höhe gleich der Höhenlage des Ortes über dem Meer in Quecksilbersäule umzurechnen. Bei mäßigen Höhen kann man auch einfach für 10 m Höhe über dem Meer 1 mm QuS von der Zahl des Wetterberichts in Abzug bringen. Liest man ein am Ort zu findendes Barometer ab, so hat man sich, außer von der Zuverlässigkeit des Instrumentes im allgemeinen, namentlich auch davon

zu überzeugen, ob die Skala nicht einfach derart verändert ist, daß die Zahl 760 mm dem normalen Barometerstand des Ortes entspricht: man legt im täglichen Leben mehr Wert darauf, daß die Bezeichnungen Veränderlich usw. stimmen, als daß die Zahlen zutreffen.

VII. Messung der Zeit und der Geschwindigkeit.

32. Stechuhr. Die Zeit wird nach Stunden, Minuten, Sekunden gemessen. Die Sekunde ist eine der Grundeinheiten des technischen Maßsystems.

Zum Messen der Zeit dient die *Uhr*. In der einfachen Taschenuhr haben wir ein Meßinstrument von einer Genauigkeit, die kein anderes technisch verwendetes Meßinstrument erreicht. Denn wenn eine Uhr täglich eine Minute gewinnt oder verliert, so ist das viel mehr, als man im gewöhnlichen Leben duldet, und doch ist erst ein Fehler von $\frac{1}{1440} \sim {}^1/_{10}\%$ vorhanden.

Man gibt die sogenannte *Uhrzeit* etwa in der Form $3^h\ 25^m\ 21^s$ an; von dieser Uhrzeit bis zu einer anderen, $5^h\ 47^m\ 32^s$, verfließt eine *Zeitdauer* von 2 st 22 m 11 s oder, des internationalen Schreibgebrauches wegen, 2 h 22 m 11 s. Man unterscheidet also (häufig) die Uhrzeiten von den Angaben einer Zeitdauer durch Hochsetzen der Einheitszeichen.

Die *Zeitdauer*, die allein zu interessieren pflegt, wird gemessen als Unterschied zweier Uhrzeiten. Ungenauigkeiten kommen dabei weniger durch die Uhr selbst in die Messung als dadurch, daß das Ablesen des Anfangs- und Endstandes der Uhr ungenau erfolgt. Dieser Fehler wird relativ um so kleiner, je größer der Zeitraum ist, während dessen man beobachtet — absolut bleibt seine Größe konstant.

Genauer als mit der gewöhnlichen Uhr kann man die Zeitdauer mit der *Stechuhr* messen. Bei ihr bestreicht ein besonderer großer Sekundenzeiger das ganze Zifferblatt, dessen Umfang eine Minute darstellt und in Fünftelsekunden geteilt ist. Dieser Zeiger läuft nicht dauernd mit, sondern wird durch einen Druck auf den sonst zum Aufziehen bestimmten Knopf zum Mitlaufen, durch einen zweiten Druck zum Stehen gebracht: nun kann man die Zeit zwischen den beiden Drücken auf Fünftelsekunden genau ablesen. Ein dritter Druck auf den Knopf bringt den großen Sekundenzeiger auf Null. Eine kleine Skala läßt erkennen, wieviel volle Umläufe — Minuten — der große Zeiger durchlaufen hatte.

Die Stechuhr ist entweder als solche für sich in jedem Uhrladen zu haben, da sie für Rennzwecke viel gebraucht wird (von 18 M. an); oder das Stechwerk ist mit einer gewöhnlichen Zeituhr kombiniert (von 60 M. an). — Sehr bequem sind die *Doppelstechuhren* von Stauffer, Son & Co. in La-Chaux-de-Fonds (etwa 140 M.): außer dem gewöhnlichen Zeiger der Stechuhr und dem gewöhnlichen Stechknopf ist ein Hilfszeiger vorhanden, der normal mit dem Hauptzeiger federnd ge-

kuppelt ist, der aber durch einen Druck auf einen besonderen Hilfsstecher angehalten werden kann. Ein zweiter Druck auf den Hilfsstecher gibt den Hilfszeiger wieder frei, so daß er durch die Federwirkung wieder zum Hauptzeiger springt. Man kann also den Hauptzeiger für den Gesamtversuch dauernd laufen lassen, die Zeit irgendeiner Zwischenablesung legt man durch Druck auf den Hilfsstecher fest und kann in Ruhe die Zeitdauer bis zu jener Zwischenablesung feststellen.

Es empfiehlt sich, wo man längere Versuchsreihen nach der Stechuhr machen will, beim Beginn zugleich die Zeituhr abzulesen, damit durch unfreiwilligen Druck auf den Stecher nicht der Versuch ganz unterbrochen wird.

33. Einheiten der Geschwindigkeit. Unter der *fortschreitenden Geschwindigkeit* eines bewegten Körpers versteht man die von seinem Schwerpunkt in der Zeiteinheit zurückgelegte Strecke Weges. Wir können sie finden, indem wir den in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Weg oder indem wir die zum Durchlaufen eines bestimmten Weges gebrauchte Zeit beobachten; beide Weisen sind nicht immer gleichwertig, S. 22. Es ist dann der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der dafür erforderlichen Zeit zu bilden. Nehmen wir dabei den Weg in Metern und die Zeit in Sekunden an, so erhalten wir die Geschwindigkeit in m/sek.

Dieses ist die für die Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung meist angewendete Einheit. Bei Eisenbahnen findet man die Geschwindigkeit in km/st, bei Schiffen in Seemeilen pro Stunde angegeben. Es ist $1\ \frac{\text{km}}{\text{st}} = \frac{1000\ \text{m}}{3600\ \text{sek}} = 0{,}278\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ und $1\ \frac{\text{SM}}{\text{st}} = \frac{1853\ \text{m}}{3600\ \text{sek}} = 0{,}515\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

Wo es sich um Drehung eines Körpers um eine Drehachse handelt — der im Maschinenbau häufigere Fall —, da haben nur die in gleichem Abstand von der Achse liegenden Punkte gleiche Geschwindigkeit, verschieden weit von der Achse entfernte Punkte haben verschiedene Geschwindigkeiten, proportional ihrem Abstand von der Achse. Man kann also nicht schlechtweg von der Geschwindigkeit des Körpers sprechen. Da aber das Verhältnis der Geschwindigkeit w eines Punktes zu seinem Abstand r von der Achse für alle Punkte das gleiche ist, so kann man dieses als kennzeichnend für die Bewegung ansehen. Dies Verhältnis $\omega = \frac{w}{r}$ heißt die *Winkelgeschwindigkeit* des Körpers. Da w die Benennung m/sek, r die Benennung m hat, so ist die Benennung oder Dimension der Winkelgeschwindigkeit $\frac{1}{\text{sek}}$. Sie ist der durchlaufene Winkel pro Zeiteinheit, der Winkel aber ist, mathematisch, eine unbenannte Zahl: 180° mathematisch $= \pi = 3{,}1416$.

Die Einheit der Winkelgeschwindigkeit ist im technischen Maßsystem diejenige, bei der der Winkel Eins $= \frac{180°}{\pi} = 57°\ 17\frac{3}{4}' = 57{,}296°$ in einer Sekunde durchstrichen wird, oder was dasselbe ist, bei der die Punkte im Abstand 1 m von der Achse die Geschwindigkeit 1 m/sek haben.

Diese Einheit ist für Messungen gar nicht gebräuchlich, in einigen Fällen aber muß man auf sie zurückgreifen, wenn man nämlich die Winkelgeschwindigkeit mit anderen Einheiten in Beziehung setzen will, so bei Ermittlung des erforderlichen Gewichts von Schwungrädern oder bei Untersuchung von Auslaufvorgängen (S. 246).

Die allgemein übliche Angabe der Winkelgeschwindigkeit ist die in minutlichen Umläufen (Touren pro Minute). Es ist 1 Uml/sek $= 2\pi$ technischen Einheiten $= 60$ Uml/min, also ist:

$$1 \text{ technische Einheit} = \frac{60}{2\pi} = 9{,}55 \text{ Uml/min} \quad . \; . \; . \quad (1)$$

oder

$$100 \text{ Uml/min} = 10{,}47 \text{ technische Einheiten} \; . \; . \; . \quad (1a)$$

34. Übersicht der Meßmethoden; Beziehungen zwischen fortschreitender und Winkelgeschwindigkeit. Die Messung der fortschreitenden Geschwindigkeit ist bei Gasen und Flüssigkeiten ausführbar mit Hilfe besonderer Instrumente, von denen der Woltmannsche hydrometrische Flügel und das Anemometer sowie die Pitotsche Röhre im folgenden besprochen werden sollen. Das Schiffslog dient zum Messen der Geschwindigkeit eines Schiffes, indem es, eingerichtet wie der Woltmannsche Flügel, die relative Geschwindigkeit des Wassers gegen den Schiffskörper mißt. Man hat aber kein Instrument, welches direkt die fortschreitende Geschwindigkeit fester Körper angibt. Will man bei festen Körpern nicht Zeit und Weg einzeln messen, so muß man die Messung auf die bequem zu ermittelnde Rotationsgeschwindigkeit zurückführen. Die Umlaufgeschwindigkeit von festen Körpern, Achsen und dergleichen kann man nämlich mit Hilfe von Umlaufzählern oder von Tachometern ermitteln, die beide im folgenden zu besprechen sind.

Die erwähnte Zurückführung der Messung fortschreitender Geschwindigkeit auf Winkelgeschwindigkeit ist so auszuführen, wie zwei Beispiele zeigen werden: Bei Lokomotiven und Automobilen mißt man die Fahrgeschwindigkeit, indem man die Drehgeschwindigkeit eines seiner Räder ermittelt. Sei diese n Uml/min, und sei D m der Raddurchmesser, so ist πD der Radumfang, der $\frac{n}{60}$ mal in der Sekunde abgewickelt wird: also ist $\frac{\pi D n}{60}$ die Umfangsgeschwindigkeit des Rades und zugleich die Fahrgeschwindigkeit des Zuges in m/sek, weil das Rad auf den Schienen nicht gleiten soll. Man kann natürlich das Tachometer, welches die Umlaufzahl des Rades feststellt, gleich für Kilometer pro Stunde eichen. Seine Angabe wird dann ungenau, wenn das Rad sich abnutzt oder nachgedreht wird. — Wir messen eine Riemengeschwindigkeit, indem wir an den Riemen ein Rädchen von bekanntem Durchmesser D halten, dessen Umlaufzahl wir dann feststellen. Wir haben uns davon zu überzeugen, ob das Rädchen nicht auf dem Riemen gleitet. Aus der Umlaufzahl der Riemenscheibe kann man die Riemengeschwindigkeit nicht genau finden, weil der Riemen auf der Scheibe gleitet, sobald Arbeit übertragen wird. Übrigens ist ja auch,

wegen der Dehnung, die Geschwindigkeit beider Trums merklich voneinander verschieden.

35. Zählwerk. Die Umlaufzahl von Wellen ermittelt man mit dem Zählwerk oder mit dem Tachometer.

Der *Umlaufzähler* oder das *Zählwerk* besteht in seinem wirksamen Teil aus einer Anzahl von zehnzähnigen Zahnrädern. Eines derselben, das Einerrad, wird direkt von der Maschine angetrieben, so zwar, daß es bei jedem Umlauf der Maschine um einen Zahn vorrückt. Da nun an seinem Umfang, den Zähnen entsprechend, die zehn Ziffern von 0 bis 9 angebracht sind, so tritt eine, und bei jeder Umdrehung der Maschine die folgende, Ziffer vor ein Schauglas, wo man sie abliest. Jedesmal nun, wenn das Einerrad von 9 wieder auf 0 geht, schiebt es durch einen Mitnehmer das folgende, sogenannte Zehnerrad um einen Zahn weiter und bringt dort, nach je zehn Umdrehungen, die folgende Ziffer vor das Schauglas. Daher liest man nach der Ablesung ⓪ ⑨ nicht wieder ⓪ ⓪ ab, sondern ① ⓪, 10 folgt auf 9, wie es sein muß. Ganz entsprechend wird nach 10 Umdrehungen des Zehnerrades das Hunderterrad um Eins vorwärtsgeschaltet, so daß auf 099 folgt 100 und so fort meist bis 100000.

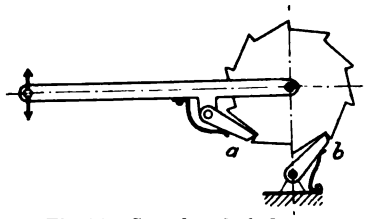


Fig. 54. Sperrkegelschaltung.

Die Vorwärtsschaltung des Einerrades kann durch eine der beiden Vorrichtungen Fig. 54 und 55 bewirkt werden. Die *Sperrkegelschaltung* ist die einfachste, Sperrkegel *a* schaltet vorwärts, *b* soll Rückwärtsgehen des Rades hindern. Der Anker, Fig. 55, ist von der Pendeluhr her be-

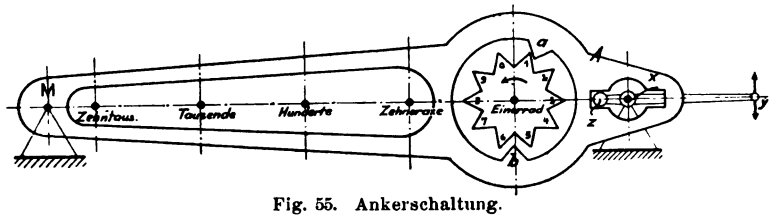


Fig. 55. Ankerschaltung.

kannt. Bewegt man von der gezeichneten Stellung aus den Anker *A* abwärts (er dreht sich um *M*), so wird Zahn *1* durch Nase *a* vorwärts geschoben; geht der Anker nun wieder hinauf, so tritt Nase *b* hinter den Zahn *6* und schiebt das Einerrad wieder vorwärts. Die hin und her gehende Bewegung des Ankers kann nun bewirkt werden, entweder indem man die kleine Welle *x* mittels Hebel *y* von einem hin und her gehenden Teil der Maschine aus antreibt, oder indem man die Welle *x* von einem rotierenden Teil umdrehen läßt. In beiden Fällen bewirkt die Kurbel *xz*, um *x* sich drehend, eine hin und her gehende Bewegung des Ankers.

Ankerzähler schalten nach jeder halben Umdrehung um eine halbe Zahl vorwärts, Sperrkegelzähler nach jeder vollen Umdrehung direkt

auf die nächste Zahl; die letzteren lassen sich daher bequemer ablesen, machen aber Geräusch.

Hat das Einerrad sich einmal ganz gedreht, so muß es das Zehnerrad um eine Zahl vorwärts schalten, dieses nach jeder Umdrehung das Hunderterrad und so fort. Die *Zehnerschaltung* wird durch ein Getriebe bewirkt, das in Fig. 56 dargestellt ist: wenn das Einerrad von 9 auf 0 geht, wird das Zehnerrad durch den Stift s vorwärts geschaltet. Das ist möglich, weil die Kerbe k zur gleichen Zeit das Zehnerrad freigibt, während das Zehnerrad sonst immer durch die Scheibe t an Drehung verhindert wird. Es mag noch nützlich sein, zu bemerken, daß das Zehnerrad zwanzig Zähne hat, von denen jeder zweite breiter ist als die übrigen. Stift s schaltet immer um zwei Zähne vorwärts, d. h. um $^1/_{10}$ Umdrehung. Stift s und Kerbe k_1 dienen dazu, in gleicher Weise das Hunderterrad anzutreiben.

Sperrkegel- und Ankergetriebe arbeiten nur bis zu mäßigen Geschwindigkeiten sicher. Zählwerke, die mit ihnen ausgerüstet sind, kann man je nach der Sonderkonstruktion bis zu 200 oder 400 minutlichen Umläufen benutzen. Für *größere Umlaufzahlen* vermeidet man die genannten Getriebe und treibt schon das Einerrad durch ein Getriebe wie in Fig. 56 an. Die Scheibe t wird dann von der umlaufenden Welle unmittelbar gedreht; Zahlen trägt sie nicht; sie schaltet bei jeder Umdrehung der Maschine das linke Rad um $^1/_{10}$ Umlauf weiter, dieses dient daher als Einerrad, betätigt seinerseits ein Zehnerrad und so fort. Man vermeidet so alle hin und her gehenden Teile, erhält ein ganz zwangläufiges Getriebe und kommt daher auf wesentlich höhere Umlaufzahlen, wenn auch bei mehr als 1000 Uml/min die Ablesung der Einer im Gang unmöglich und die Abnutzung der stoßweise bewegten Teile groß wird. Man kann diese Zähler nicht mehr von hin und her gehenden Maschinenteilen aus antreiben. — Für die größten Geschwindigkeiten, etwa für Dampfturbinen, hat man Zählwerke mit nur gleichförmig umlaufenden Teilen; die Ablesung geschieht an einer Reihe von Zeigern, deren Achsen durch Zahnradübersetzung im Verhältnis 1 : 10 miteinander verbunden sind und die sich vor kreisförmigen Skalen vorbeibewegen, die Einer, Zehner, Hunderter abzulesen gestatten. Die Ablesung von Zeigern ist unbequemer als die von springenden Zahlen.

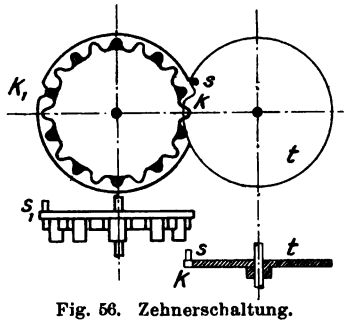


Fig. 56. Zehnerschaltung.

Bei allen Zählwerken — ebenso bei Gasuhren u. dgl. — liest man im richtigen Augenblick zunächst die letzten Zahlen oder Zeiger ab, die schnell laufen; die langsamer laufenden Hunderte und Tausende setzt man dann davor, muß aber darauf achten, ob etwa inzwischen eine der Zahlen von 9 auf 0 gegangen ist, wodurch sich auch die vorhergehende geändert hätte.

Um die Umlaufzahl einer Maschine festzustellen, liest man den Stand des Zählers am Anfang und wieder am Ende einer Zeitperiode

ab, die so lang wie möglich sei; denn man kann nur volle Umläufe ablesen, und das Fehlen der Bruchteile, sowie eine Ungenauigkeit im Zeitpunkte der Ablesungen verliert an Einfluß bei längerer Zeitdauer. Um die mittlere minutliche Umlaufzahl für eine Stunde zu finden, zähle man also nicht alle zehn Minuten je eine Minute lang, sondern man notiere alle zehn Minuten den Stand des Zählers: die Differenz von End- und Anfangsangabe, geteilt durch 60, gibt die mittlere Umlaufzahl: die Zwischenablesungen nach 10, 20 ... Minuten kontrollieren die Gleichmäßigkeit des Maschinenganges. Daß man bei kurzen Ablesungszeiten etwas größere Genauigkeit erreicht, unter Verwendung einer Stechuhr, mit deren Hilfe man die Zeit für 10 oder 20 Umläufe feststellt, wissen wir von S. 22.

36. Tachometer. Tachometer geben die augenblickliche Geschwindigkeit der Maschine, ihre jeweilige minutliche Umlaufzahl, durch Ab-

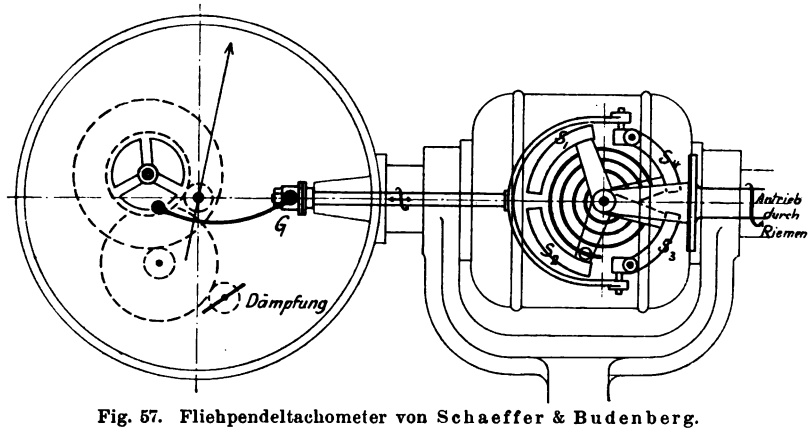


Fig. 57. Fliehpendeltachometer von Schaeffer & Budenberg.

lesung eines Zeigers. Durch das Umlaufen der Instrumentenwelle werden Kräfte wachgerufen, die die Zeigerverstellung bewirken, meist entgegen einer Feder, die den messenden Teil bildet. Die verstellende Kraft ist meist die Fliehkraft umlaufender Massen, aber auch Wirbelströme in einem magnetischen Feld können die Verstellkraft liefern (Fliehkraft- oder Zentrifugaltachometer, Wirbelstromtachometer). Eine Reihe von Instrumenten beruht auch auf ganz anderer Grundlage.

Getriebe von *Fliehpendeltachometern* sind in den Fig. 57 und 58 wiedergegeben: In Fig. 57 bilden die Schwungmassen S_1 und S_3, andererseits S_2 und S_4 je ein Gußstück. Die Spiralfeder ist mit dem äußeren Ende an S_2, mit dem inneren an S_1 befestigt und wird gespannt, wollen die Gewichte sich von der Drehachse entfernen. Fliegen die Gewichte der Federkraft entgegen auseinander, so wird, wie ersichtlich, der Zeiger bewegt. Ein Universalgelenk bei G läßt es zu, daß das Zeigergetriebe nicht mit umzulaufen braucht. Eine Windflügeldämpfung verhindert Zuckungen des Zeigers durch die Ungleichförmigkeit von Kolbenmaschinen. — In Fig. 58 stellt sich infolge der Rotation der Körper S,

eine flache runde Scheibe, mehr oder weniger senkrecht zur Rotationsachse und spannt dabei die Schraubenfeder, die einerseits mit ihm, andererseits mit der Rotationsachse verbunden ist. Die Bewegung wird wieder auf einen Zeiger übertragen, G ist ein Kugelgelenk.

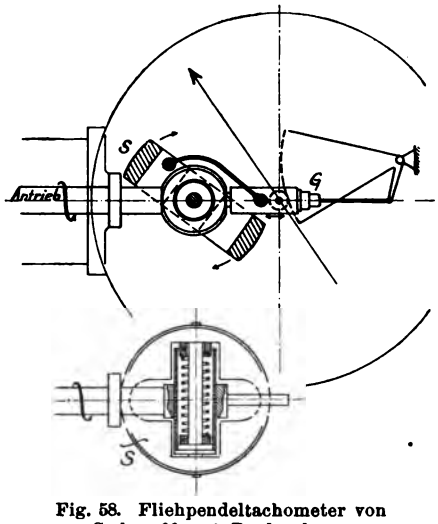


Fig. 58. Fliehpendeltachometer von Schaeffer & Budenberg.

Die Theorie des Tachometers ist die der Zentrifugalregler mit Federbelastung. Jeder Umlaufzahl der Welle soll eine bestimmte Stellung des Zeigers, also ein bestimmter Ausschlag der Schwungmassen, entsprechen. Beginnt die Welle sich zu drehen, so lösen sich die Schwungmassen von ihrem inneren Widerlager, sobald bei einer Tourenzahl n_0 die Fliehkraft die Vorspannung der Feder überwindet. Beim Auseinanderfliegen der Schwungmassen nimmt nun sowohl die Fliehkraft als auch die ihr entgegenstehende Federkraft zu, und es ist nicht gesagt, daß sich bei einer Umlaufzahl $n > n_0$ ein Gleichgewichtszustand überhaupt findet. Hatte nämlich beim Auseinanderfliegen die Fliehkraft schneller zugenommen als die Federkraft, so gewinnt sie mehr und mehr die Oberhand über letztere und die Schwungmassen, gehen gleich in die äußerste Stellung, bis ans äußere Widerlager. Die Federkraft muß also schneller zunehmen als die Fliehkraft, und zwar muß das in jeder Pendellage der Fall sein (statisches Verhalten, im Gegensatz zu astatischem).

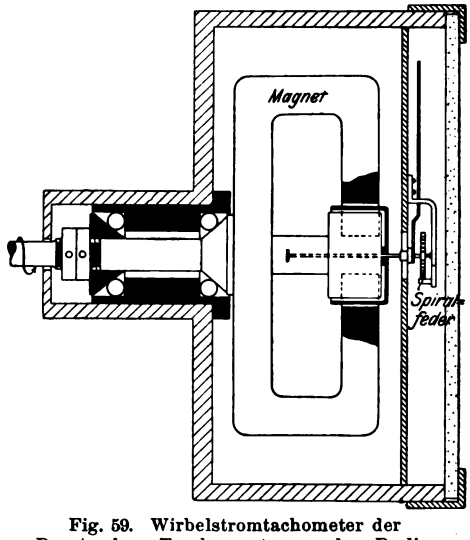


Fig. 59. Wirbelstromtachometer der Deutschen Tachometerwerke, Berlin.

Ein *Wirbelstromtachometer* ist in Fig. 59 dargestellt. Die Welle trägt einen mitumlaufenden gebogenen Stahlmagneten, dessen Kraftlinien durch einen zwischen die Pole gelegten auch mitumlaufenden Eisenanker geschlossen werden. Zwischen den Polen und dem Anker bleibt ein Ringraum, in dem eine Glocke aus Aluminium auf einer leichten Achse

drehbar gelagert ist; eine Spiralfeder zieht den auf der gleichen Achse sitzenden Zeiger in seine Nullstellung. Beim Umlaufen des Magnetsystems werden in der Aluminiumglocke Wirbelströme entstehen, Glocke und Zeiger werden also um so weiter mitgenommen, je schneller die Rotation ist. Diese Anordnung ist stets ohne weiteres statisch. Da die Wirksamkeit dieser Instrumente nicht auf Massenwirkungen beruht, auch keine empfindlichen Gelenke vorhanden sind, so sind sie gegen Erschütterungen weniger empfindlich als die Fliehpendelinstrumente. Dagegen bereitet bei schwankenden Geschwindigkeiten die Tatsache Schwierigkeiten, daß eine Dämpfung des Zeigers, wie wir sie in Fig. 57 sahen, nicht gut anzuordnen ist. Ein grundsätzlicher Unterschied der Wirbelstrominstrumente gegenüber fast allen anderen Formen ist es, daß sie auf die beiden Drehrichtungen mit Ausschlägen nach verschiedener Richtung ansprechen. Das ist nur selten nötig, gelegentlich aber lästig; man kann Instrumente, die für beide Drehrichtungen dienen sollen, nicht mit unterdrücktem Nullpunkt herstellen.

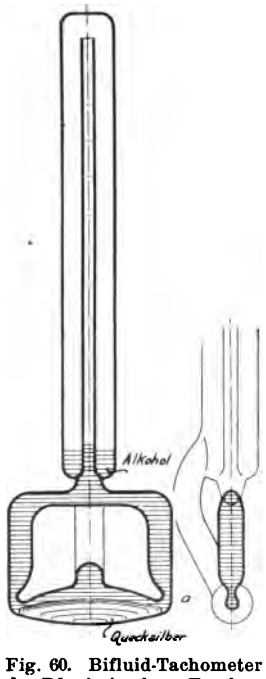


Fig. 60. Bifluid-Tachometer der Rheinischen Tachometerwerke, Freiburg i. B.

Flüssigkeitstachometer nutzen die Fliehkraft einer in ein Gefäß eingeschlossenen Flüssigkeit aus; als messender Teil dient die Flüssigkeitssäule selbst, etwa wie folgt.

In einem um seine senkrechte Achse rotierenden zylindrischen Gefäß stellt sich die Oberfläche der Flüssigkeit in die Gestalt eines Rotationsparaboloids ein. Aus der Höhenlage des Scheitels kann man auf die Umlaufzahl schließen: Das Glas selbst ist mit einer Skala versehen, oder eine solche steht daneben still. Ältere Instrumente dieser Art sind die Gyrometer von Braun. In den *Bifluid-Tachometern* ist die Konstruktion vervollkommnet. Ein Glaskörper der Gestalt Fig. 60 rotiert um seine Achse. Im unteren Teil befindet sich etwas Quecksilber, darüber gefärbter Alkohol. Beim Rotieren tritt das Quecksilber in die seitlichen senkrechten Teile und treibt den Alkohol in dem mittleren engen Rohr hoch; seine Höhe gibt die Umlaufzahl an. Diese Tachometer sind für die verschiedensten Zwecke herstellbar. Die Breite des unteren Teils und die Menge des Quecksilbers sowie die Weite des senkrechten Mittelrohrs bestimmen die mittlere Umlaufzahl und den Meßbereich des Instrumentes, die Einschnürungen bei *a* bestimmen seine Dämpfung. Die Instrumente sind für stationären Betrieb vortrefflich, die Reibung ist bei Flüssigkeiten vermieden, und da das Glas ganz zugeschmolzen ist, so ist Unveränderlichkeit der Angaben besser gesichert als bei Pendeltachometern. Auch Stöße sind einflußlos, solange sie nicht zum Bruch führen.

Einige für *Sonderzwecke* verwendete Anordnungen seien noch erwähnt. Auf Lokomotiven hat man, wegen der Unempfindlichkeit gegen Stöße, eine Öl- oder Glyzerinpumpe aus einem Behälter saugen lassen, in den das Öl durch eine feine Düse hindurch wieder zurückläuft: In einem Windkessel zwischen Pumpe und Düse entsteht um so höherer Druck, je schneller die Pumpe umläuft, man kann also ein Manometer am Windkessel anbringen und direkt für Umläufe pro Minute einteilen. Die Schwierigkeit ist, daß bei wechselnden Temperaturen die umlaufende Flüssigkeit verschieden zähe ist, auch mit der Zeit sich ändert.

Bei dieser Einrichtung kann auch bereits die Ablesung in einiger Entfernung geschehen. Für eigentliche *Fernablesung* sind wie überall so auch bei der Geschwindigkeitsmessung diejenigen Methoden besonders brauchbar, die eine elektrische Übertragung mittels einfachen Drahtes gestatten. An Meßapparaten ist dann jedesmal ein Geber und ein Empfänger vorhanden, wobei nichts im Wege steht, von einem Geber aus mehrere Empfänger zu betätigen oder einen Empfänger durch Umschaltung die Umlaufzahl des einen oder des anderen Gebers anzeigen zu lassen. — Für die Fernmeldung kommen namentlich folgende Formen in Frage.

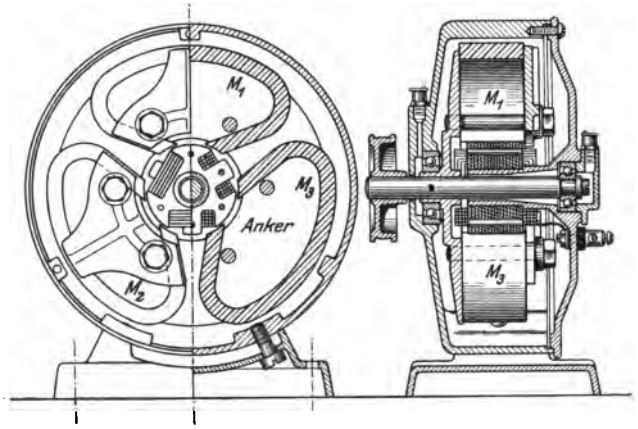


Fig. 61. Erreger für Ferntachometer, von Hartmann & Braun.

Ein kleiner elektrischer Generator, am einfachsten für Wechselstrom (Fig. 61), erzeugt im Anker eine Spannung, die mit der Umlaufzahl wächst. Benutzt man ihn als Geber, so kann man als Empfänger ein Voltmeter anschließen und für Umläufe eichen (Fig. 62, unten).

Als Empfänger sind auch mit demselben Geber (der dann allerdings für Wechselstrom sein muß) die Frahmschen Resonanzkämme zu benutzen (Fig. 62, oben). Auf einem Balken sind eine Reihe von stählernen Blattfedern befestigt, die an ihrem freien Ende zu einem Kopf kurz umgebogen sind; dessen Gewicht wird nun durch Hinzufügen oder Entfernen von Zinn so abgepaßt, daß die Eigenschwingungszahl jeder der Federn einen bestimmten Wert annimmt. Wird der die Federn tragende Balken einem periodischen Impuls von bestimmter Schwingungszahl ausgesetzt, so geraten hauptsächlich diejenigen Federn in Bewegung, deren Eigenschwingungszahl mit der Schwingungszahl der Erregung ganz oder annähernd übereinstimmt; die größten Ausschläge treten bei voller Übereinstimmung (bei Resonanz) auf. Man kann also die Impulszahl der Erregung messen, die bei Fig. 61, wegen der sechs Pole ab-

wechselnder Polarität, das Dreifache der Umlaufzahl des Gebers ist. Werden die Federn des Kammes untereinander so abgestimmt, daß jede folgende $1^2/_3$ Schwingung mehr ausführt als die vorhergehende, so kann man die Umlaufzahlen von 5 zu 5 ablesen und noch Zwischenwerte schätzen: wenn zwei benachbarte Kämme gleich weit ausschlagen, so ist die Umlaufzahl gerade das Mittel aus den beiden ihnen entsprechenden Werten. In Fig. 62 gibt der Spannungszeiger eine Anzeige mit weitem Meßbereich, der beim Anlassen der Maschine bequem ist; die Kämme geben, bei beschränktem Meßbereich, eine in der Nähe der Betriebsumlaufzahl sehr weit geteilte Skala. Die Angabe der Kämme ist überdies, bei Verwendung guten Stahls, sehr unveränderlich, auch ganz unabhängig von der Länge und dem Widerstand der Zuleitung, so daß man mittels des Regelwiderstandes den Spannungszeiger nach dem Kamme einregeln kann.

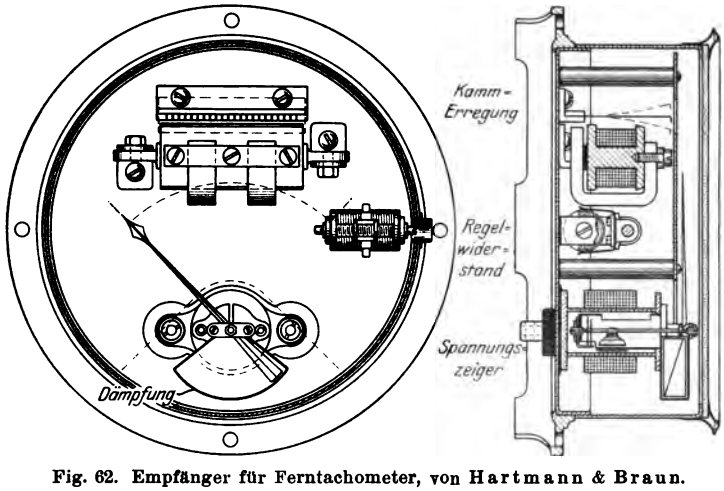


Fig. 62. Empfänger für Ferntachometer, von Hartmann & Braun.

Zur Erregung der Kämme genügt es auch schon, das Instrument auf die Maschine zu setzen, deren Umlaufzahl bestimmt werden soll, sofern die Maschine für die Periodenzahl des Kammes (von 900/min ab) schnell genug läuft und daher eine Übersetzung nicht nötig ist. Für kleinere Entfernungen hat man mechanische Erregungen mittels Kurvenscheibe und Drahtübertragung angewendet.

Der *Antrieb der Tachometer* geschieht meist durch eine Riemenübertragung von der Welle aus, deren Umlaufzahl man messen will. Man wählt die Riemenscheibe des Tachometers so, daß das Tachometer passend schnell rotiert. Deshalb fertigt jede Tachometerfabrik nur wenige Tachometertypen, die sich untereinander durch den *Meßbereich*, das heißt das Verhältnis der niedrigsten zur höchsten Umlaufzahl, unterscheiden, und paßt sie mittels verschiedener Riemenscheiben den zu messenden Umlaufzahlen an. Das Zifferblatt ist dann nicht nach der Umlaufzahl des Tachometers, sondern der zu messenden Welle ge-

teilt und muß die Angabe der Riemenübersetzung enthalten; der Meßbereich der Tachometer pflegt zwischen 1 : 2 und 1 : 6 zu liegen; ein weiter Meßbereich erhöht die Verwendbarkeit des Instrumentes auf Kosten der Genauigkeit (S. 17). Die Wirbelstromtachometer pflegen, wie erwähnt, von Null zu zählen. — Der Antriebriemen sei gleichmäßig, die Naht soll keine Verdickung bilden; andernfalls stößt der Zeiger des Instrumentes. Ein Gummiriemen mit Hanfeinlage oder ein Hanfgurt sind brauchbar; ein Lederriemen muß dünn und geleimt, nicht genäht sein.

37. Handinstrumente. Zählwerk und Tachometer werden außer für ständigen Antrieb durch eine Maschine auch als Handinstrumente ausgeführt. Die Achse des Instrumentes endet dann in eine Dreikantspitze oder in einen Gummipfropfen, die in einen Körner am Ende der rotierenden Welle eingesetzt werden.

Handzählwerke bestehen meist aus einer Zusammenstellung von Stechuhr und eigentlichem Zählwerk. Beide beginnen gleichzeitig zu laufen, wenn man den Dreikant so kräftig in den Körner der Welle preßt, daß die kleine Hülse h (Fig. 63) einer Federkraft entgegen eingedrückt wird. Beim Zurücknehmen des Dreikants von der Welle hören Zählwerk und Uhr gleichzeitig zu laufen auf, und man liest beide ab, um die Anzahl der Umdrehungen durch die Zeit, auf $^1/_5$ sek genau ablesbar, teilen zu können. Die Ablesung des Zählwerkes erfolgt auf der Seite, die in der Figur nicht sichtbar ist. Schnepper i stellt die Uhr auf Null.

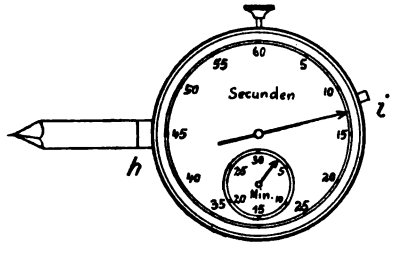


Fig. 63. Handzählwerk.

Handtachometer sollen für möglichst alle Maschinen brauchbar sein, von der Dampfturbine mit einigen tausend bis herab zur Pumpe mit nur vielleicht 40 Umläufen minutlich. Der weite Meßbereich würde enge Skalenteilung und ungenaue Ablesung bedingen. Man kann ein Tachometer, dessen Werk für die Umlaufzahlen von vielleicht 125 bis 500 gebaut ist, verwenden und durch Zahnräder für andere Umlaufzahlen brauchbar machen. Das Tachometer hat etwa die Meßbereiche 40 bis 160; 125 bis 500; 400 bis 1600; 1250 bis 5000 und ist, je nachdem man die eine oder andere Zahnradübersetzung durch einfaches Verschieben eines Knopfes einschaltet, im ganzen von 40 bis 5000 Umläufen brauchbar. In allen Fällen macht die eigentliche Tachometerachse Umlaufzahlen von 125 bis 500 in der Minute. Das Zifferblatt hat mehrere Numerierungen, deren eine oder andere man abliest.

Ein Wellenkörner nimmt die Dreikantspitze nur dann sicher mit, wenn er selbst dreikantig ausgearbeitet ist. Sonst tritt leicht Gleiten ein, ebenso wenn statt des Dreikants ein Gummipolster als Mitnehmer gebraucht wird. Sehr zuverlässig wird die Kupplung des Meßinstrumentes mit der Welle durch einen Draht von $^3/_4$ bis 1 mm Durchmesser erreicht, den man an beiden gut befestigt. Er tordiert sich erst,

nimmt aber dann sicher mit, auch bei großer Länge und auch wenn er beliebig gebogen wird. Nur werden Ungleichmäßigkeiten des Ganges nicht sofort übertragen, er wirkt als Dämpfung. Der Draht erspart das ermüdende Andrücken der Instrumente. Stahlspiralen von vielleicht 0,5 mm Draht und 5 mm Windungsdurchmesser sind noch besser.

38. Vergleich. *Zählwerk und Tachometer* ergänzen einander, und man hat oft bei Versuchen beide Instrumente an der Maschine. In § 12 machten wir schon auf den Unterschied zwischen dem Tachometer, einem Skaleninstrument, das die augenblickliche Geschwindigkeit und ihre Schwankungen anzeigt, und dem Zählwerk aufmerksam, welches die augenblicklichen Geschwindigkeiten aufaddiert und dann die mittlere Geschwindigkeit während einer Minute, einer Stunde ausrechnen läßt. Für den Betrieb oder für die Einstellung einer Maschine ist das Tachometer bequemer; bei Dampfverbrauchsversuchen aber will man die mittlere Umlaufzahl kennen, die das Zählwerk ohne weiteres sehr genau gibt, das Tachometer viel ungenauer, wenn es nicht gut geeicht ist und wenn man es nicht sehr oft abliest.

In den Regeln für Leistungsversuche an Kolbenmaschinen ist daher festgesetzt, die Messung der Umlaufzahl solle mittels Zählwerk geschehen; es sollte das aber nicht sowohl nach der Art der Maschine als nach der Meßmethode festgesetzt werden: bei Indizierungen und Bremsungen geht die Umlaufzahl ins Meßresultat ein, daher ist ihre möglichst gute Messung mittels Zählwerks anzuwenden. Die elektrische Leistungsmessung ist unabhängig von der Messung der Umlaufzahl, daher genügt hier die tachometrische Messung, zumal bei Turbinen, durchaus. — Andererseits wird die Zählung der Umläufe dann zweckmäßig sein, wenn der Maschinengang von der Tourenzahl besonders stark abhängt, so bei einer Kreiselpumpe, die gegen eine überwiegend geodätische Förderhöhe arbeitet.

39. Nicht gleichförmige Geschwindigkeiten. Wo es sich nicht um die Messung einer konstant bleibenden Umlaufzahl handelt, sondern wo die Ungleichmäßigkeiten einer Bewegung gemessen werden sollen, muß man sich mechanischer Hilfsmittel bedienen, da das Auge nicht imstande zu sein pflegt, die Ablesungen genügend schnell und genau zu machen.

Die Unregelmäßigkeiten des Maschinenganges sind von zweierlei Art. Bei einer Belastungsänderung ändert sich die Umlaufzahl jeder Maschine, und zwar nimmt sie zu bei einer Entlastung, sie nimmt ab bei einer Mehrbelastung. Diesem natürlichen Vorgang wirkt der Regler entgegen, der die Aufgabe hat, die Maschine auf etwa der gleichen Umlaufzahl bei allen Belastungen zu halten, ihr diese aufzuzwingen. Bis das dem Regler gelingt, dauert einige Zeit. Die Umlaufzahl der Maschine schwankt daher bei einer Belastungsänderung auf und ab, um so weniger, je besser die Regelung wirkt.

Außerdem weisen diejenigen Kraftmaschinen, die mit Kolben arbeiten, Unregelmäßigkeiten innerhalb der einzelnen Umdrehung auf, die man als ihre Ungleichförmigkeit bezeichnet. Sie rühren daher, daß die treibende Kraft periodisch wirkt, in den Totpunkten oft Null wird,

während der Widerstand konstant oder doch nach anderem Gesetz veränderlich ist. Diese Ungleichförmigkeit in mäßigen Grenzen zu halten, ist wesentlich die Aufgabe des Schwungrades.

Schwierigkeiten für die Messung bietet insbesondere die letztgenannte Art von Geschwindigkeitsänderungen, sowohl deshalb, weil die Schwingungen sehr schnell verlaufen — es handelt sich um das, was innerhalb

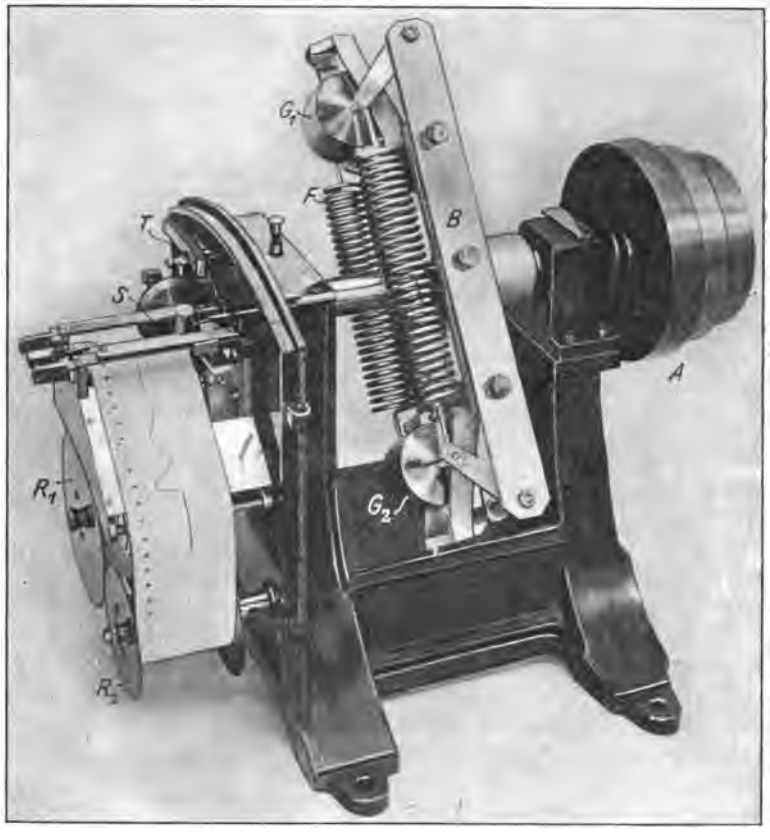


Fig. 64. Hornscher Tachograph.

eines Maschinenumganges vor sich geht —, als auch deshalb, weil die Schwankungen bei den meisten Maschinen von kleiner Amplitude sind: bei Dampfdynamos pflegt man nur Schwankungen von etwa $^1/_{200}$ der mittleren Umlaufzahl zuzulassen, und es ist dann festzustellen, ob diese Grenze nicht überschritten ist.

Wenn wir uns zunächst auf weniger schnell vorsichgehende Schwankungen beschränken, so ist das beliebteste Mittel zu ihrer Beobachtung der *Hornsche Tachograph*. Er ist in Fig. 64 im Bilde dargestellt. Man erkennt auf einem umlaufenden Rahmen *B* zwei Schwunggewichte

G_1 und G_2, die durch Federn F zueinander gezogen werden, und deren Fliehkraft die Federkraft überwindet. Die Verstellung der Schwunggewichte verstellt mittels eines durch die hohle Welle hindurchgehenden Gestänges einen mit Spezialtinte gefüllten Schreiber S, der auf einem Papierstreifen schreibt. Die Federn sind so bemessen, daß der Schreibstift bei 500 Umläufen der Tachographenwelle auf die Mitte des Papierstreifens einspielt; man richtet die antreibenden Gurtscheiben A so ein, daß der Tachograph gerade 500 Umläufe macht bei der normalen Umlaufzahl der Maschine. Von dieser normalen Umlaufzahl sind Abweichungen von plus oder minus 12% nötig, um die Schreibfeder in die beiden äußersten Lagen zu bringen; dementsprechend ist der vor dem Schreibgefäß ablaufende Papierstreifen mit einer Teilung versehen, wie Fig. 64 es erkennen läßt. Die Federn des Tachographen sind auswechselbar gegen solche, die nur für $\pm$ 6% oder bis $\pm$ 3% Geschwindigkeitsänderung ausreichen; man verwendet dann entsprechend bezifferte Papierstreifen. Von der Tachographenwelle aus wird auch der Papierstreifen vorwärtsbewegt, durch ein Reibrollengetriebe das bei T eine Einstellung des Papiervorschubes und auch ein Abstellen gestattet. Das Papier wird einer Rolle R_1 entnommen und gegebenenfalls auf eine andere Rolle R_2 aufgewickelt.

Nach Ingangsetzen hat man nun eine einfache Eichung der Übersetzung vorzunehmen, etwa indem man in einem beliebigen Beharrungszustand der Maschine die Stellung des Schreibgefäßes zu + 2,4% und gleichzeitig durch ein Zählwerk die Umlaufzahl der Maschine zu 121,2 Uml/min festlegt. Dann ist 102,4% = 121,2 Uml/min, also 100% = 118,2 Uml/min, als mittlere Umlaufzahl anzusehen; eine Stellung des Schreibgefäßes auf — 6% würde also eine Umlaufzahl der Maschine von $118{,}2 \cdot 0{,}94 = 111{,}1$ Uml/min anzeigen. Natürlich kann man durch mehrfaches Vergleichen dieser Angaben mit der wahren Umlaufzahl der Maschine die Genauigkeit der Papierteilung prüfen.

Nach Vornahme solcher Prüfung ist der Tachograph zur Aufnahme von Tachogrammen bereit, und man hat nur die gewünschten Änderungen insbesondere der Belastung an der Maschine vorzunehmen, um ihre Geschwindigkeitsänderungen aufgezeichnet zu erhalten; so ist auf dem Papierband Fig. 64 die Kurve gezeichnet, wie man sie bei einer Entlastung zu erhalten pflegt.

Die Geschwindigkeit wird nicht genau als Funktion der Zeit aufgetragen, weil die Papiergeschwindigkeit mit der Maschinengeschwindigkeit schwankt. Meist kann man aber die Schwankungen der Papiergeschwindigkeit unbeachtet lassen; ihre Berücksichtigung erforderte sonst ein umständliches Umzeichnen des Tachogrammes; für genauere Versuche ist es vorzuziehen, den Papierstreifen durch einen Elektromotor getrennt anzutreiben.

Die Massen der umlaufenden Teile und des Stellzeuges des Tachographen sind durch Verwendung von Aluminium und Stahl möglichst klein gemacht. Trotzdem wird der Schreibstift den Vorgängen in der Maschine etwas nachhinken. Erstens teilt sich die Geschwindigkeitsänderung durch den Gurttrieb hindurch nicht augenblicklich dem In-

strument mit, auch wenn man große und dabei leichte Riemenscheiben verwendet; zweitens eilt der Schreibstift in seiner Stellung den Geschwindigkeitsänderungen der Tachographenwelle nach (§ 7). Daher eignet sich der Tachograph zur Darstellung der Schwankungen bei Belastungsänderungen, weil sich diese über mehrere Umläufe der Maschine erstrecken. Den Schwankungen innerhalb des einzelnen Umlaufs kann er nicht so folgen, daß man wirklich Rückschlüsse auf den Verlauf der Geschwindigkeit daraus ziehen könnte, namentlich auch deshalb nicht, weil der antreibende Riemen oder Gurt ungleichmäßig ist und dadurch schon Schwankungen erzeugt werden. Die Kurven, Fig. 65, sind an der gleichen Maschine, eine mit Gurtantrieb, eine mit Riemen aufgenommen. — Das Tachogramm einer Gasmaschine stellt Fig. 66 dar. Wenn auch die Schwankungen innerhalb eines Umlaufs deutlich erkennbar sind, so werden sie doch, der Größe nach, nicht genau wiedergegeben sein.

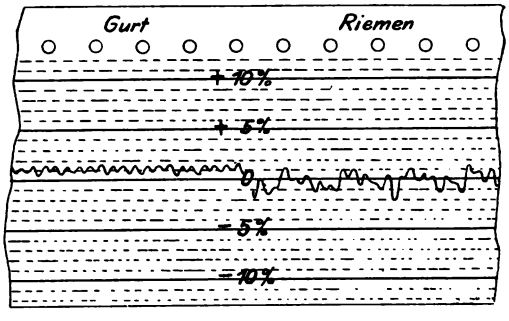


Fig. 65. Einfluß des Antriebes auf das Tachogramm.

Trotz dieser Einwendungen ist der Tachograph für genügend langsam verlaufende Schwankungen ein sehr wertvolles Instrument. Er genügt indessen nicht an Stellen, wo sein Meßbereich von höchstens $\pm$ 12% zu klein ist, oder wo es sich um schnell verlaufende Schwankungen handelt.

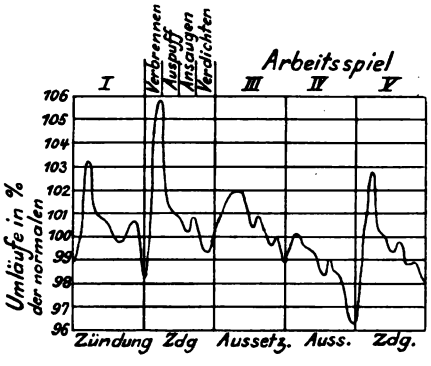


Fig. 66. Tachogramm einer Gasmaschine. (Nach Güldner.)

Der kleine Meßbereich ist beispielsweise störend bei Auslauf- oder Anlaufversuchen mit Maschinen, bei denen man beobachten will, wie schnell eine Maschine nach Abstellen der Triebkraft noch läuft, oder wie schnell sie in Gang zu bringen ist. Bei Schiffsmaschinen sind solche Untersuchungen über die Manövrierfähigkeit wichtig. Bei Pumpmaschinen kommen beim Regeln viel größere Ungleichförmigkeiten vor, als der Tachograph aufzeichnen kann; durch Verwendung anderer Federn aber würde er leicht zu wenig empfindlich werden. Für solche Fälle kann man entweder registrierende Tachometer (im Grunde genommen auch Tachographen und auch häufig so bezeichnet) verwenden, die einen viel weiteren Meßbereich haben, aber

meist doch nicht bis Null herabgehen — oder man kann folgendes Verfahren anwenden, das überhaupt dem Tachographen an Genauigkeit weit überlegen, nur für häufige Benutzung in der Auswertung zu umständlich ist.

Man kann nämlich auf einen ablaufenden schmalen Papierstreifen Marken schreiben lassen, deren Abstand je einem oder bei höheren Umlaufzahlen je fünf oder zehn Umläufen der Maschine entspricht; dazu läßt man durch die Maschine bei jedem oder bei jedem fünften oder zehnten Hub — in den letzteren Fällen unter Zuhilfenahme einer Zahnradübersetzung — einen elektrischen Kontakt kurze Zeit schließen und betätigt durch den Strom ein elektromagnetisches Markenschreibzeug, wie wir es bei Besprechung der Indikator-Zeitdiagramme S. 282 kennen lernen werden. Da man nicht auf genaue Konstanz der Papiergeschwindigkeit rechnen kann, so verwendet man besser zwei Markenschreibzeuge, deren zweites dann durch ein Pendel oder dergleichen alle Sekunden oder nach Bedarf auch alle halbe oder jede zweite Sekunde erregt wird. Man erhält ein Bild nach Fig. 67 und kann für die eingetragenen Abmessungen folgende Auswertung vornehmen: Es ist im Wegdiagramm 7 Umläufe $\equiv$ 52,3 mm; es ist im Zeitdiagramm 2 sek $\equiv$ 57,7 mm; also wird 7 Uml. $\equiv \frac{52{,}3}{57{,}7} \cdot 2$ sek $= 1{,}811$ sek; die Maschine machte $\frac{7}{1{,}811} \cdot 60$ $= 231{,}9$ Uml/min. — Man kann sich auch des schwingenden Markenschreibzeuges bedienen, das ebenfalls im Anschluß an den Indikator (S. 281, Fig. 230) besprochen werden wird und das Zeit und Geschwindigkeit zugleich aufschreibt, so daß man nur ein Schreibzeug nötig hat.

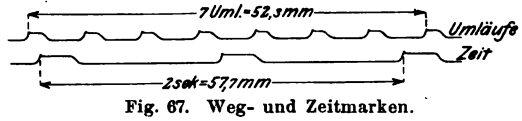


Fig. 67. Weg- und Zeitmarken.

Bei veränderlicher Geschwindigkeit mißt man die einzelnen Umläufe aus. Treibt man den Papierstreifen von der Maschine aus an, so werden die Abstände der Umlaufmarken konstant bleiben, die der Zeitmarken mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner werden. Treibt man den Papierstreifen von einem besonderen Motor aus an, so werden die Zeitmarken den Abstand beibehalten, die Umlaufmarken werden mit zunehmender Geschwindigkeit näher aufeinander rücken.

Das Verfahren dient nicht nur zum Aufzeichnen umlaufender, sondern auch *fortschreitender* Geschwindigkeit. So kann man bei Messung der Wassermenge mittels Schirmes (S. 134) mit Hilfe von Kontakten, die der Schirmwagen in vorher ausgemessenen Abständen schließt, die Bewegung des Schirmes registrieren lassen; auch hier pflegt man Zeitmarken zugleich aufzuschreiben.

Man kann mit Hilfe der beschriebenen mechanischen Schreibzeuge nicht wohl mehr als zwei bis drei Marken sekundlich schreiben lassen, sollen die Marken noch sauber meßbar bleiben. Doch kann man das vielfach abänderbare Verfahren auch für viel schneller verlaufende Änderungen der Geschwindigkeit verwenden, wenn man anders konstruierte Schreibzeuge verwendet oder wenn man die mechanische Auf-

zeichnung durch eine elektrische ersetzt. Bedarf nach solchen Methoden liegt auch in der Technik vor, so zur Untersuchung der Geschoßbewegung im Geschützlauf sowie zur Untersuchung der Ungleichförmigkeit des Maschinenganges innerhalb eines einzelnen Umlaufs; für letzteren Zweck liefert, wie wir sahen, der Tachograph nur qualitativ brauchbare Ergebnisse, und auch diese nur bei besonderer Vorsicht. Wir wollen nur andeuten, welche Wege man mit wechselndem Erfolg zur Lösung der schwierigen Aufgabe eingeschlagen hat[1]).

Frahm[2]) untersuchte die Ungleichförmigkeit von Schiffswellen, indem er auf einem um einen Wellenbund gelegten oxydierten Zinkstreifen durch einen Schreibstift schreiben ließ; der Stift schrieb durch elektrolytische Wirkung weiße Striche, wenn Strom durch ihn ging; der Strom wurde durch einen Elektromotor sekundlich eine bekannte Anzahl von Malen unterbrochen. Die weißen Striche haben also bei konstanter Umlaufgeschwindigkeit der Welle überall den gleichen Abstand voneinander: Ungleichheiten im Abstand deuten auf Ungleichförmigkeit hin und lassen sie messen. — Klönne[3]) schlug den umgekehrten Weg ein: er spannte ein durchlochtes Stahlband auf den Umfang des Schwungrades; jedes der Löcher unterbrach einen Strom, wenn ein Kontaktstift über das Stahlband hinwegglitt. Der Strom wurde von einem Induktorium geliefert und gab Funken auf einer schnell umlaufenden, polierten und berußten Trommel; die Abstände der Funkenmarken wurden ausgemessen. Die Versuchseinrichtungen sind neuerdings von Runge[4]) mit Erfolg für mechanische Registrierung mittels elektromagnetischen Schreibzeuges umgearbeitet worden, mit dem bis zu 60 Zeichen in der Sekunde sicher gegeben werden konnten und das auf geschwärztem Papier schrieb. Wurde die Umlaufzahl der Trommel so geregelt, daß ein Umlauf zeitlich gerade einem (oder zwei) Abständen der Stahlbandlochung entsprach, so erhielt man ein Bild, bei dem die Anfangspunkte der Ausschläge direkt die Abweichungen der Schwungradstellung aus der Sollage bei gleichförmiger Drehung angeben. Nach Anbringung einiger Korrektionen zeigte es sich, daß die Ergebnisse dieser Messung mit den nach dem Indikatordiagramm zu erwartenden Ungleichförmigkeiten übereinstimmten, so daß die Methode also auch da anwendbar ist, wo man nach dem Indikatordiagramm die Auswertung nicht machen kann, z. B. bei starker Abhängigkeit des Momentes von der jeweiligen Geschwindigkeit, etwa wenn mehrere Dynamomaschinen parallel arbeiten. — Mader[5]) sucht mittels eines besonderen Apparates, des Undographen, die Amplitude der einzelnen Glieder einer Fourierschen Reihe zu messen, durch die man sich die Ungleichförmigkeit wiedergegeben denken kann; er benutzt dazu die Tatsache, daß eine auf der ungleich förmig rotierenden Scheibe schleifende Bremsbacke eine Kraftwirkung erfährt, die mit der Geschwindigkeit wechselt; die einzelnen Wellen der Fourierschen Reihe werden nacheinander durch Resonanz hervorgehoben.

[1]) Ältere Verfahren zusammenstellend beschrieben in Elektrot. Z. 1911, Heft 43.
[2]) Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 797.
[3]) Elektrot. Z. 1902, S. 715.
[4]) Forschungsarbeiten, im Druck.
[5]) Dinglers Polyt. J. 1909, Bd. 324, S. 567.

40. Hydrometrischer Flügel. Das vornehmste Instrument zur Messung von Wassergeschwindigkeiten in Flußläufen, Turbinengerinnen und dergleichen ist der Woltmannsche hydrometrische Flügel (Fig. 68 und 69). Der arbeitende Teil ist das Flügelrad *A*, von 5 bis 25 cm Durchmesser, das ähnlich einem Schiffspropeller geformt ist: die Schaufeln sind Teile von Schraubenflächen. Wenn nun das Wasser parallel zur Achse fließt, so dreht es das Rad um so schneller, je schneller es fließt. Aus der minutlichen Umlaufzahl des Flügelrades kann man also auf die Wassergeschwindigkeit schließen. Um die Umlaufzahl des Rades zu zählen, ist in Fig. 68 ein Umlaufzähler *Z* angeschlossen: die Schnecke greift in zwei Zahnräder mit 100 und 101 Zähnen, deren Gangdifferenz daher die vollen Hunderte von Umläufen angibt. Ist der Flügel unter Wasser gebracht, so kann man die Arretierung *D* durch Heben von *B* lösen und nach gewisser Zeit durch Drücken auf *C* wieder

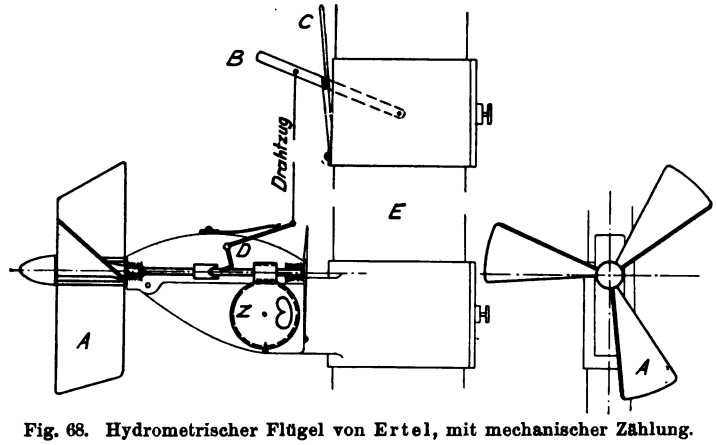


Fig. 68. Hydrometrischer Flügel von Ertel, mit mechanischer Zählung.

einfallen lassen. Man nimmt den Flügel nun heraus und liest die Zahl der Umläufe ab. Bequemer ist die Umlaufzählung bei Fig. 69; das Schneckenrad schließt nach je 50 oder je 100 Umläufen des Meßrades einen elektrischen Kontakt, und man bestimmt mittels Stechuhr die Zeit zwischen zwei dadurch über Wasser bewirkten Glockensignalen. Diese Meßart ist genauer als die erstgenannte, weil der Flügel beim Beginn der Messung schon in Gang ist, und weil die Zeitbestimmung mittels Stechuhr sicherer ist; sie ist auch bequemer, weil man den Flügel zwischen mehreren Messungen nicht aus dem Wasser zu nehmen braucht.

Das Instrument steckt man mit der Hülse über einen Stab *E*, der auf der Gerinnesohle aufsteht und an dem man es auf und ab schieben und in passender Höhe befestigen kann.

Hätte ein hydrometrischer Flügel keine Lagerreibung, und wären die Flügel genaue Schrauben von sehr geringer Wanddicke, so würde sich, sobald das Wasser fließt, der Flügel durch das Wasser hindurch-

winden, ohne die Wasserbewegung im geringsten zu stören. Er selbst würde so schnell umlaufen, daß er sich durch das Wasser hindurchschraubt, er müßte also einen Umlauf machen in derselben Zeit, in der das Wasser um die Ganghöhe der Schraube vorgerückt ist, wie ja eine Mutter auf einer Schraube um eine Ganghöhe bei jeder Umdrehung vorrückt. Das wäre ein idealer hydrometrischer Flügel. Er machte bei doppelter Wassergeschwindigkeit w die doppelte Umlaufzahl n in der Minute, es wäre also $w = a \cdot n$, wo a eine von der Ganghöhe abhängige Konstante des Instrumentes ist.

In Wirklichkeit hat ein Flügel Reibung in seinen Lagern und in der Übersetzung zum Zählwerk. Diese bewirkt, daß der Flügel bei sehr langsamer Wasserbewegung überhaupt nicht umläuft und weiterhin um einen gewissen Betrag hinter der theoretischen Umlaufzahl zurückbleibt, um so viel nämlich, daß die dadurch entstehende Schlüpfung der Schraubenganghöhe gegenüber der Wassergeschwindigkeit zum Über-

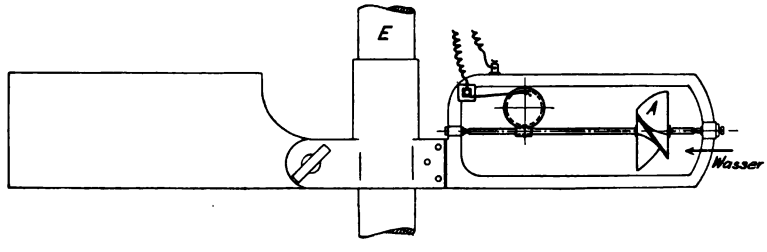


Fig. 69. Hydrometrischer Flügel von Ott, für elektrische Zählung.

winden der Reibung ausreicht. Die Wassergeschwindigkeit ist um einen gewissen Betrag größer, als man nach der Formel $w = a \cdot n$ erhalten würde: es ist

$$w = a\,n + b$$

die sogenannte *Flügelgleichung*. Dabei wird b etwa konstant sein, da die Reibung annähernd konstant ist. b ist, wie man sieht, die kleinste Wassergeschwindigkeit, welche nötig ist, um den Flügel überhaupt in Gang zu bringen: die Anlaufgeschwindigkeit.

Die Formel $w = a\,n + b$ ist es, die meist den Messungen mit dem Woltmannschen Flügel zugrunde gelegt wird. Umständlichere Gleichungen gibt es, die noch Nebeneinflüsse, insbesondere die Störungen, berücksichtigen wollen, die durch die Befestigungsweise der Flügel an der Achse hervorgerufen werden. Wir verweisen dieserhalb auf Z. d. V. d. Ing. 1895, S. 917. Für ganz kleine Wassergeschwindigkeiten, 0,1 bis 0,3 m/sek, wo der Flügel verhältnismäßig langsamer läuft, muß man auf die umständlicheren Gleichungen zurückgreifen, sonst genügt die einfache. In den Grenzen, in denen man die einfache lineare Flügelgleichung als richtig ansehen kann, kann man die Angabe des Woltmannschen Flügels auch bei wechselnder Wassergeschwindigkeit als die mittlere Geschwindigkeit ansehen.

Beobachtet man bei elektrischer Zählung die Zeit t für eine gewisse Anzahl x von Umdrehungen, so gibt man der Flügelgleichung zweckmäßig eine andere Form. Schreibt man unsere Flügelgleichung $w = a \cdot \frac{x}{t} + b$, so ist $a\,x$ für ein Instrument konstant, und wir können schreiben:

$$w = \frac{c}{t} + b;$$

hierin sind nun b und c die Flügelkonstanten. Bei wechselnden Wassergeschwindigkeiten gibt diese Gleichung wegen der Krümmung einer Hyperbel nur dann befriedigende Mittelwerte, wenn die Wassergeschwindigkeiten nicht zu weit gewechselt haben, wenigstens nicht von einer Kontaktgabe zur nächsten. Das ist ein grundsätzlicher Fehler der elektrischen Zählung.

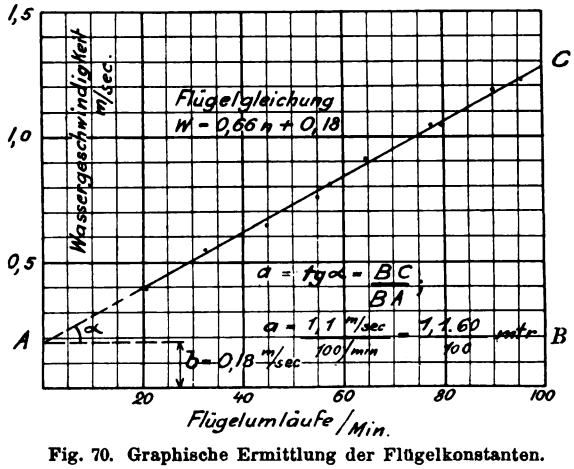


Fig. 70. Graphische Ermittlung der Flügelkonstanten.

Welche Flügelgleichung man aber auch annehmen möge, stets wird man die Koeffizienten, also a und b oder b und c, durch eine *Eichung* bestimmen. Man schleppt dazu den Flügel mit bekannter, meßbarer Geschwindigkeit durch ruhendes Wasser; die Relativbewegung ist dann annähernd dieselbe, wie wenn der Flügel an Ort bleibt und das Wasser fließt. Die Ausführung zweier solcher Versuche bei verschiedenen Geschwindigkeiten genügt, um die zwei Koeffizienten zu berechnen, man wird aber mehr Versuche machen, um genauere Werte derselben zu erhalten. Zur rechnerischen Bestimmung wäre dann die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate erforderlich. Für die meisten Zwecke wird indessen die graphische Bestimmung der Koeffizienten aus den Eichresultaten genügen: man trägt die sekundliche oder minutliche Umlaufzahl des Flügels bei verschiedenen Wassergeschwindigkeiten auf und erhält die Punkte etwa wie in Fig. 70. Man kann die Gerade AC hindurchlegen und dann a und b, wie in der Figur angegeben, entnehmen. Oder man kann der Koeffizienten und überhaupt jeder Flügelgleichung entraten und einfach ein Bild, wie Fig. 70, als rein empirische Darstellung der Wirkungsweise des Flügels ansehen. Endlich kann man auch die Anzahl der minutlichen Umläufe des Flügels um $\frac{b}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{b}{a}$ vermehren, also mit einer Korrektion von $\frac{0{,}18}{0{,}66} = 0{,}272$ Umläufen sekundlich $=$ $+16$ Umläufen minutlich rechnen, worauf weiterhin einfach $w = 0{,}66\,n$ ist.

Bassins zum Eichen der Flügel durch Schleppversuche sind an verschiedenen Hochschulen, so in München, Berlin, Dresden, Hannover, vorhanden. Bei Bedarf wird man besser tun, einen Flügel dort prüfen zu lassen, als ihn mit primitiven Mitteln selbst zu eichen. Von den Fabrikanten wird der einzelne Flügel nicht immer durch Schleppen geeicht, sondern nur durch Vergleichen mit einem Normalflügel. Das ist einfacher und dabei zuverlässiger als ein primitiv angeordneter Schleppversuch.

Meist dienen die Flügelmessungen zur Bestimmung der durch einen Querschnitt gehenden Wassermenge, vgl. § 56.

41. Anemometer. Jedes Anemometer besteht aus dem Kraftwerk, auf das die zu messende Windgeschwindigkeit einwirkt, und dem Meßwerk. Als Kraftwerk dient entweder das Flügelrad (Fig. 71) oder das Schalenkreuz (Fig. 72 und 73). Die Messung kann durch Zählwerk (Fig. 71), oder elektrisch (Fig. 72), oder endlich durch Tachometer (Fig. 73) erfolgen.

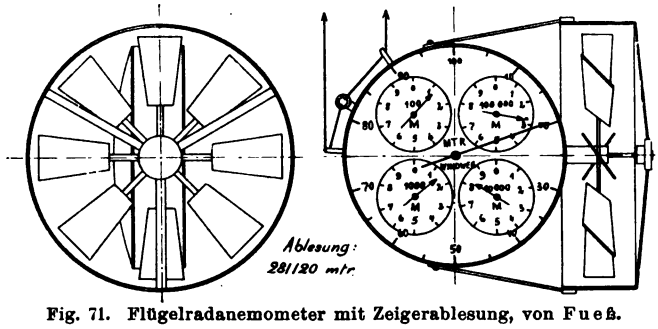


Fig. 71. Flügelradanemometer mit Zeigerablesung, von Fueß.

Das *Flügelrad* besteht aus einer Anzahl sternförmig um eine Welle angeordneter Flügel, die gegen die zur Achse senkrechte Radebene geneigt sind. Der in Richtung der Achse kommende Wind wird daher, auf die Flügel treffend, eine Drehung erstreben, die ähnlich wie beim Woltmann-Flügel bei widerstandslosem Gang des Instrumentes eine Umfangsgeschwindigkeit des Rades veranlaßt von solcher Größe, daß die minutliche Axialgeschwindigkeit der Schraubenfläche gleich der Windgeschwindigkeit wird. Allerdings kann diesmal nur von Durchschnittswerten gesprochen werden, da die Schaufeln eben zu sein pflegen. Bei einer durchschnittlichen Neigung von 45° gegen die zur Achse normale Ebene würde der Schwerpunkt der Schaufeln eine Geschwindigkeit gleich der Windgeschwindigkeit annehmen, der Umfang also bereits größere Geschwindigkeiten. Sind die Schaufeln mit weniger als 45° gegen die Radebene geneigt, so wird die Geschwindigkeit des Umlaufes größer als die Windgeschwindigkeit. Den bedeutenden Windgeschwindigkeiten entsprechen bedeutende Fliehkräfte, auch tritt ein nicht unerheblicher Winddruck in Richtung der Achse auf, solange das Rad noch nicht die Geschwindigkeit des Windes besitzt, also beim Einbringen in den Windstrom. Aus allem folgt, daß man nur mäßige Windgeschwindig-

keiten mittels des Flügelrades messen kann, da bei größeren der Bestand des Rades gefährdet ist.

Das *Schalenkreuz* besteht aus einem um eine Achse drehbaren Kreuz, dessen Arme je eine hohle halbkuglige Schale tragen. Die Schnittebenen der Halbkugeln gehen durch die Achse, und die Halbkugeln sind so angeordnet, daß bei einer Drehrichtung alle Höhlungen sich auf der rückwärtigen Seite befinden. Der Wind wird daher stets auf der einen Seite eine konkave, auf der andern Seite eine konvexe Halbkugelschale sich entgegengekehrt finden. Auf beide übt er Kräfte aus, die aber bei derjenigen Halbkugelschale größer sind, die dem Wind die konkave Seite entgegenkehrt, in deren Höhlung er also hineinbläst. Denn der Wiederzusammenschluß der Luftfäden hinter der Kugelschale wird in geringerem Maße turbulent sein da, wo die Fäden der Krümmung der Halbkugelschale folgen, als im andern Fall. Daraus ergibt sich ein stärkerer Unterdruck auf der Abwindseite für diejenige Kugelschale, die dort dem Wind die Kugelfläche als Führung bietet. Da aber nur der Unterschied der auf die beiden Kreuzhälften wirkenden Kräfte frei wird, so nimmt der Schalenmittelpunkt nur Geschwindigkeiten an, die hinter der Windgeschwindigkeit zurückbleiben. Seine Geschwindigkeit wird tatsächlich nur etwa $^1/_3$ der Windgeschwindigkeit. Wegen der kleineren auftretenden Fliehkräfte ist daher das Schalenkreuz für große Windgeschwindigkeiten geeigneter als das Flügelrad. Hinzu kommt, daß das Schalenkreuz an sich stabiler ist, sowie insbesondere, daß beim allmählichen Einbringen des Schalenkreuzes in einen Kanal auch dann keine schädlichen, sondern immer nur drehende Kräfte auftreten, wenn das Instrument erst teilweise in den Luftstrom eintaucht. Beim Flügelrad hingegen treten beim Eintauchen nur einer Hälfte des Rades einseitige Kräfte parallel zur Achse auf, die der Achse und den Schaufeln Beanspruchungen zumuten, denen sie nicht gewachsen sind: gerade beim Einbringen erfolgen daher am leichtesten Brüche oder Verbiegungen.

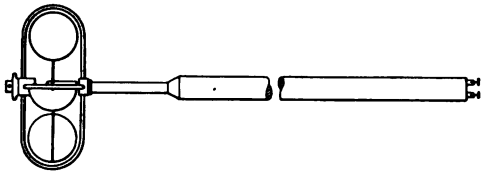


Fig. 72. Schalenkreuzanemometer für elektrischen Kontakt, von Rosenmüller.

Das Flügelrad ist für Geschwindigkeiten bis herauf zu höchstens 10 m/sek brauchbar, das Schalenkreuz herauf bis zu 50 m/sek. Abwärts allerdings reagiert das Schalenkreuz erst auf Geschwindigkeiten von 1 m/sek, während man Flügelradinstrumente durch Verwendung von Glimmerflügeln an einem Rade genügenden Durchmessers (z. B. 150 mm) für Luftgeschwindigkeiten herab bis zu 0,1 m/sek brauchbar machen kann.

Wenn für die Ablesung der Geschwindigkeiten ein Zählwerk verwendet wird, so pflegt dies aus umlaufenden Zeigern zu bestehen. Für Versuchszwecke ist es selten wertvoll, daß man die Windwege bis herauf in die Millionen Meter ablesen kann, da man selten mehr als 100 oder

höchstens 1000 m Windweg zu messen pflegt. Da andererseits durch die Zeiger höherer Ordnung der Gang des Instrumentes beeinträchtigt und der Preis erhöht wird, so sollte man die Instrumente nur mit so viel Zeigern beschaffen, wie wirklich nötig sind. — Die elektrische Beobachtung durch Klingelsignal ist bequemer, sobald man mehrfach Beobachtungen zu machen hat. Für eine einzelne Ablesung ist der Anbau der Batterie und Klingel immerhin zeitraubend.

Die Instrumente Fig. 71 und 72 messen den zurückgelegten Weg des Windes, der am Instrumente vorbeigestrichen ist. Um die Geschwindigkeit zu finden, hat man die Stechuhr gleichzeitig zu beobachten und aus beiden Angaben die Geschwindigkeit zu berechnen. Wie beim Woltmannschen Flügel wird die Anbringung einer Berichtigung nötig, deren Größe durch Eichung festzustellen ist.

Im Gegensatz zu diesen Instrumenten mißt das *Anemotachometer* (Fig. 73) unmittelbar die Windgeschwindigkeit. Mit dem Schalenkreuz als Kraftwerk ist ein vollständiges Tachometer verbunden, das die Umlaufzahl der Schalenkreuzachse anzeigt, bzw. dessen Skala unmittelbar in m/sek eingeteilt sein kann. Die Messung ist demnach viel schneller und bequemer auszuführen, allerdings spricht das Instrument erst auf Geschwindigkeiten von etwa 3 m/sek an, läßt sich auch nicht in ganz kleinen Typen ausführen. Auch kann man bei der engen Teilung der Skala des Anemotachometers die Ablesegenauigkeit nicht so weit treiben wie bei den Anemometern, bei denen die Ablesegenauigkeit durch Steigerung der Zeit fast unbegrenzt gesteigert werden kann. Das ist kein Vorteil insofern, als die wahre Meßgenauigkeit des Anemometers doch viel eher begrenzt ist durch die Unsicherheiten, die durch wechselnde Turbulenz und Temperatur der Luft hervor gerufen werden (S. 100). Darüber aber, wie stark die Angaben eines Anemometers durch diese Einflüsse verändert werden, ist wenig bekannt.

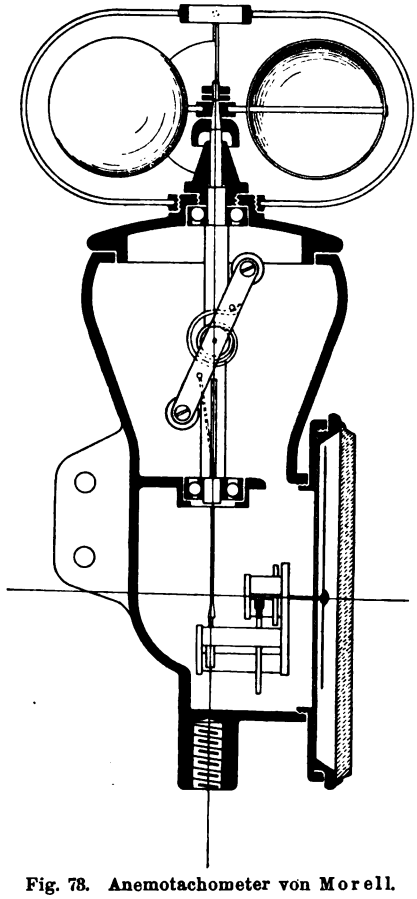


Fig. 73. Anemotachometer von Morell.

Zur *Eichung* der Anemometer kann man nicht Schleppversuche machen, weil es sich um zu große Geschwindigkeiten handelt. Man setzt

wendet, deren Strömung untersucht werden soll. Verwenden wir zur Messung eine andere Flüssigkeit, so ist eine Umrechnung des Ablesungswertes in diejenige Flüssigkeitssäule vorzunehmen, die untersucht wird. Das wird stets notwendig sein bei Gasen, bei denen man die Messung durch ein Flüssigkeitsmanometer zu bewirken pflegt. Es wird aber auch notwendig sein, wenn wir in Fig. 75 den oberen Teil, der ein Flüssigkeitsmanometer darstellt, dadurch empfindlicher machen wollen, daß wir den lufterfüllten Raum mit einer passenden Flüssigkeit (S. 64), etwa mit Toluol füllen, damit nicht mehr eine Wassersäule h, sondern der Unterschied in dem Gewicht einer Wassersäule und einer Toluolsäule für die Druckmessung wirksam wird, so daß die Ausschläge größer werden — was wichtig ist bei kleinen zu messenden Geschwindigkeiten.

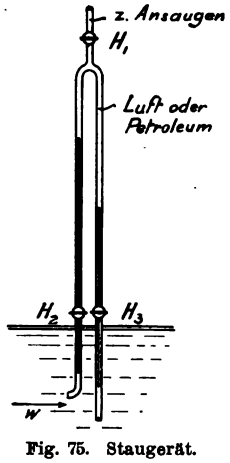


Fig. 75. Staugerät.

Wir machen uns unabhängig von dem Zwang, eine Säule gleicher Beschaffenheit zur Messung zu benutzen, indem wir von der Beziehung Gebrauch machen (S. 50), daß der von einer Flüssigkeits- oder Gassäule vom spezifischen Gewicht γ kg/cbm und von der Höhe h m auf die Unterlage ausgeübte Druck p in kg/qm oder in mm WS gegeben ist durch die Beziehung

$$p = h \cdot \gamma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Diese Beziehung in Formel (1) eingesetzt, entsteht

$$w = \sqrt{2g\frac{p'}{\gamma}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Diese Beziehung führt allgemein die Messung der Geschwindigkeit auf die Messung des ihr entsprechenden *Staudruckes* p' zurück.

Anordnungen der *Pitotrohre* nach Fig. 74 und 75 ergeben unvollkommene Werte, weil an der winkelrecht abgeschnittenen Mündung Wirbelungen auftreten, die nach Maßgabe von Fig. 76 im allgemeinen ein Absenken des Wasserspiegels im Innern des Rohres gegenüber außen zur Folge haben. Der Betrag der Absenkung hängt von der genaueren Gestaltung des Rohrrandes ab. Die Erscheinung wurde schon auf S. 68 besprochen: eine richtige Messung des statischen Druckes einer strömenden Flüssigkeit ist nur durch eine in glatter Wand sorgsamst angebrachte Entnahmeöffnung möglich, an der die Parallelität der Stromfäden gar nicht gestört wird. Die Erscheinung macht Anordnungen nach Fig. 74 und 75 unbrauchbar.

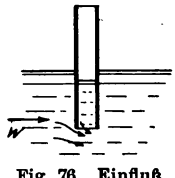


Fig. 76. Einfluß der Wirbelungen.

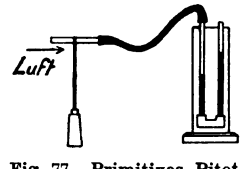


Fig. 77. Primitives Pitotrohr für Luft.

Das gleiche läßt sich über die einfache Form von Staugeräten sagen, die man wohl zur Messung von Luftgeschwindigkeiten verwendet hat und von denen Fig. 77 eine sehr einfache Form darstellt, um zunächst das Grundsätzliche zu erläutern. Ein einfaches Rohr wird dem Luftstrom entgegengekehrt. Es ist durch einen Gummischlauch mit einem wassergefüllten U-Rohr verbunden, in dem sich die Säulen verschieden hoch einstellen, wenn die Luft eine Geschwindigkeit in der Pfeilrichtung hat. Auch hier sollte sein $w = \sqrt{2g\frac{p'}{\gamma}}$. Das Instrument wird deshalb den Staudruck unrichtig anzeigen, weil an der offenen Mündung des U-Rohres Störungen auftreten und also der innere oder statische Druck falsch abgenommen wird. Wollte man aber das Manometer, etwa durch einen vorgehaltenen Schirm, gegen die Einflüsse der Geschwindigkeit schützen, so würden die durch die Schirmwirkung auf der Abwindseite hervorgerufenen Unterdrucke ähnliche Störungen verursachen. Ungeeignet ist das Gerät insbesondere, sobald man nicht die Strömung der freien Luft, sondern diejenige in einer Rohrleitung untersuchen will, in der ein Druckunterschied gegen außen herrscht oder doch möglich ist. Zur Feststellung der Geschwindigkeit wird hier immer eine Messung auch des statischen Druckes nötig sein.

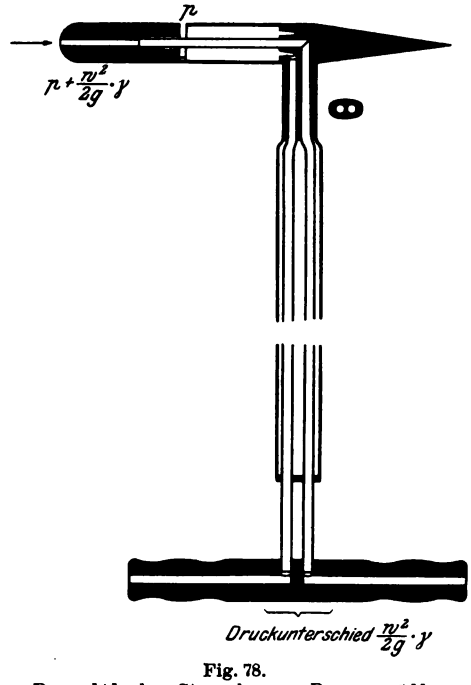


Fig. 78.
Prandtlsches Staurohr, von Rosenmüller.

Zwei neuere, für Luft erprobte und für Flüssigkeiten zweifellos ebenso brauchbare Staugeräte sind in Fig. 78 und 79 dargestellt. Für die Entnahme des *statischen Druckes* p des zu untersuchenden Gases sind Öffnungen auf dem Mantel eines zylindrischen Teiles angeordnet in solchem Abstande vom Kopfe, daß man in jener Gegend bereits auf gut parallelen Verlauf der Stromfäden rechnen kann. Es sind Öffnungen über den Umfang verteilt (Fig. 79) oder es ist ein um den Umfang herumgehender Schlitz angeordnet (Fig. 78), damit nicht durch geringe Neigungen des Rohres gegen die Strömungsrichtung wesentliche Fehler in die Messung kommen. Während diese seitlichen Entnahmeöffnungen den statischen Druck entnehmen, entnimmt eine dem Strom

entgegengekehrte Öffnung einen Druck, der um den *Staudruck* $\frac{w^2}{2g} \cdot \gamma$ größer ist als der statische Druck, und den man neuerdings als *Gesamtdruck* p'' bezeichnet. Von den beiden Druckentnahmestellen sind Rohre durch einen Schaft von an die Verhältnisse angepaßter Länge hindurchgeführt zu Schlauchstutzen, von denen aus man das Staugerät mit einem Differentialmanometer in Verbindung bringt; mit dessen Hilfe kann man den Druckunterschied zwischen beiden Entnahmestellen, das ist der Staudruck $p' = p'' - p$, messen; aus ihm folgt die Geschwindigkeit nach Formel (3).

Die Gestalt der Staugeräte, Fig. 78 und Fig. 79, ist versuchsmäßig so bestimmt, daß Gleichung (3) ohne weiteres gültig ist. Bei beliebig gestalteten Geräten pflegt zwar auch die quadratische Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Staudruck einigermaßen zuzutreffen, doch ist in Gleichung (3) eine Berichtigungszahl ζ einzuführen, die mehr oder weniger von Eins abweicht. Von den beiden abgebildeten Formen ist Fig. 78 weniger abhängig davon, daß die Richtung des Staurohres genau mit der Strömungsrichtung übereinstimmt. Es ist das eine wichtige Eigenschaft in allen Fällen, in denen die Richtung nicht genau bekannt ist — das ist selbst bei Rohrleitungen nicht der Fall, sobald der fortschreitenden eine Drehbewegung überlagert ist, so daß also die gesamte Bewegung eine Schraubenbewegung ist. Es wäre in diesem Falle allerdings oft wünschenswert, nicht die Geschwindigkeit selbst, sondern ihre in die Rohrrichtung fallende Komponente zu messen — dann nämlich, wenn die Feststellung der Menge der Endzweck der Messung ist.

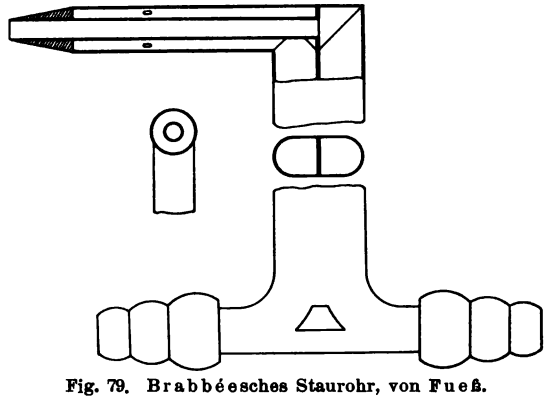


Fig. 79. Brabbéesches Staurohr, von Fueß.

Fig. 79 hat gegenüber Fig. 78 den Vorteil einer größeren Stauöffnung. Das ermöglicht schnelleres Arbeiten mit dem Gerät. Bei jeder Änderung der zu messenden Geschwindigkeit und auch beim Einbringen des Staugerätes ist nämlich ein bestimmtes Volumen von Gas oder Flüssigkeit in das Manometer und in die Leitungen bis zu ihm einzufüllen, entsprechend der verdrängten messenden Flüssigkeitssäule und entsprechend der Druckänderung in allen lufterfüllten Räumen. Es sind also bei Messung von Gasgeschwindigkeiten große Räume in den Verbindungsleitungen zwischen Staugerät und Manometer zu vermeiden. Bei Messungen an Flüssigkeiten oder an Gasen sind außerdem große Widerstände in den Zuleitungen zu vermeiden, wie ein solcher beispielsweise durch die verhältnismäßig kleine Stauöffnung der Fig. 78 dargestellt wird.

Zu erwähnen wäre noch, daß Luftblasen in einer wassergefüllten Leitung, Gasreste oder Wassersäcke in einer lufterfüllten Leitung, und daß Temperaturunterschiede zwischen den beiden Leitungen da, wo sie senkrecht laufen, die Messung stören können. Diese Störungen können sehr erheblich werden, wenn die zu messenden Druckdifferenzen klein sind.

Man hat Staugeräte nach dem Schema der Fig. 80 ausgeführt: von zwei Öffnungen ist eine dem Strom zu-, die andere ihm abgekehrt; eine mißt daher die Summe aus statischer und dynamischer Druckhöhe $p + \frac{w^2}{2g}$, die andere die Differenz der gleichen Größen $p - \frac{w^2}{2g}$; der Unterschied beider ist $2 \cdot \frac{w^2}{2g}$, und man hätte also die Messung des statischen Druckes umgangen. — Die Senkung an der dem Strom abgekehrten Öffnung pflegt nun aber wesentlich kleiner zu sein als die Geschwindigkeitshöhe. Die Annahme, daß in dieser Form das Pitotrohr ohne Eichung verwendbar sei, trifft daher nicht zu. Auch hier üben Wirbelbildungen hinter der abgekehrten Öffnung einen theoretisch nicht bestimmbaren Einfluß.

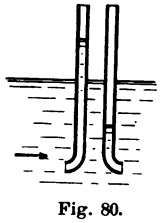


Fig. 80.

Die *Stauscheibe* von Recknagel (Fig. 80a) ist eine kreisförmige Scheibe von etwa 1 cm Durchmesser. Vor ihr staut sich der Luftstrom und erzeugt Überdruck, an ihrer Rückseite entsteht Unterdruck. Den Druckunterschied zwischen den Scheibenmitteln zu beiden Seiten kann man durch feine Bohrungen messen, die zu einem Differentialmanometer führen. Im Wesen ist die Vorrichtung dasselbe wie ein Pitotrohr. Nach Versuchen von Recknagel und Krell soll für Luft die entstehende Druckdifferenz, gemessen in mm WS, recht gleichmäßig $1{,}37 \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma$ sein. In der Lüftungstechnik ist die Stauscheibe in Verbindung mit dem empfindlichen, ebenfalls von Recknagel angegebenen Mikromanometer (S. 61) recht gebräuchlich. Nach neueren Versuchen scheint jedoch bei durchwirbelter Strömung die Stauscheibe unbrauchbar, jedenfalls schlechter zu sein, als die Geräte Fig. 78 und 79.

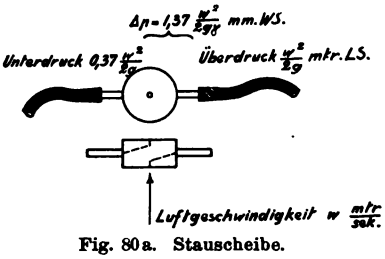


Fig. 80a. Stauscheibe.

Im *Vergleich mit umlaufenden Instrumenten* haben die Staugeräte den Vorzug augenblicklicher Ablesung und den weiteren Vorzug, daß man die Messung mehr an einem bestimmten Punkt macht, während das Anemometer immer den Mittelwert über eine ziemlich große Fläche hin bildet; beispielsweise kann man mittels Pitotrohres die Verteilung der Geschwindigkeit über den Querschnitt eines relativ engen Rohres messen. Hinsichtlich der Genauigkeit ist es schwer, einem von beiden den Vorzug zuzusprechen; insbesondere bei kleinen Geschwin-

digkeiten macht sich bei umlaufenden Instrumenten der Einfluß der Reibung bemerkbar, während beim Pitotrohr die Tatsache lästig wird, daß die abzulesende Größe dem Quadrat der zu messenden porportional ist, wodurch man (§ 10) bald auf sehr kleine Ausschläge des Manometers kommt.

Zu beachten ist noch, daß eine große Genauigkeit bei Messung der Geschwindigkeit von Flüssigkeiten und Gasen deshalb im allgemeinen unerreichbar ist, weil die Medien sich zugleich in wirbelnder Bewegung befinden, so daß im Freien die Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung einen eindeutigen Wert überhaupt nicht hat; bei Rohrleitungen kann man die Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung eindeutig als Quotienten aus Fördermenge und Rohrquerschnitt definieren, aber eben diese Geschwindigkeit nicht sicher messen; als Quotienten der genannten Größen könnte man sie finden, wenn nicht meist gerade die Ermittlung der Menge aus der Geschwindigkeit (§ 55) der Zweck der Messung wäre.

VIII. Messung der Stoffmenge.

43. Einheiten; Gewicht, Volumen, spezifisches Gewicht. Die Angabe der Menge eines gemessenen Stoffes, sei er fest, flüssig oder gasförmig, kann nach *Gewicht* oder im *Raummaß* erfolgen.

Die Angabe nach Gewicht geschieht meist in Kilogrammen und dessen Untereinheiten. In Deutschland ist auch das Pfund, 1 Pfund = 500 g = 0,5 kg, ein gesetzliches Maß. 100 Pfund = 50 kg heißen gesetzlich ein Zentner, 100 kg sind ein Doppelzentner, auch wohl Meterzentner, d. h. Zentner im metrischen System. Das englische Pfund ist merklich kleiner als das deutsche, 1 Pfund engl. = 453 g.

Die Angabe nach Volumen erfolgt in Kubikmetern (abgekürzt cbm, Dimension m^3) oder den bekannten Untereinheiten desselben.

Für einen und denselben Stoff und unter bestimmten Bedingungen für Druck und Temperatur sind die beiden Angaben voneinander abhängig. Es ist nämlich $G = V \cdot \gamma$, wenn wir mit G das Gewicht und mit V das Volumen bezeichnen; γ ist das spezifische Gewicht des Stoffes. Das *spezifische Gewicht* ist im technischen Maßsystem das Gewicht eines Kubikmeters des Stoffes. Aus $\gamma = \frac{G\,\mathrm{kg}}{V\,\mathrm{cbm}}$ folgt, daß die Einheit des spezifischen Gewichts $1\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{cbm}}$ ist. Seine Dimension ist $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$.

In der Physik ist es üblich, das spezifische Gewicht als absolute Zahl zu geben. Diese Zahl gibt an, wievielmal schwerer der Körper ist als das gleiche Volumen Wasser von 4° C. Diese Art der Angabe fügt sich dem technischen Maßsystem nicht ein, ist aber sehr bequem. Das

spezifische Gewicht Eins der Physik wird in der technischen Mechanik als 1000 kg/cbm wiedergegeben. Übrigens bezeichnet man vielfach jene Zahl nicht als spezifisches Gewicht, sondern als *Dichte* oder *Relativgewicht*.

Es wird nützlich sein, besonders darauf hinzuweisen, daß man die Dichte von Flüssigkeiten (und festen Körpern), gleichgültig welche Temperatur sie gerade haben, möglichst auf Wasser von 4° als Normalstoff bezieht; denn bei dieser Temperatur wiegt 1 Liter Wasser, der Definition gemäß, 1 kg. Man ist bei der Messung häufig nur in der Lage, das Gewicht einer zu untersuchenden Flüssigkeit mit dem Gewicht des Wassers von gleicher Temperatur zu vergleichen. Dann wird also eine Umrechnung nötig. Ist 0,810 das gemessene Relativgewicht eines Alkohols bei 20° C, bezogen auf Wasser von 20° C, so entnehmen wir der Fig. 81, daß Wasser von 20° C 998,5 kg/cbm wiegt, also ein Relativgewicht 0,9985 hat, bezogen auf Wasser von 4°; die Dichte des Al-

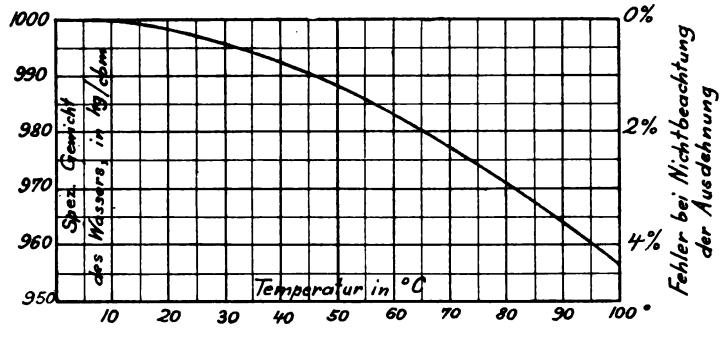


Fig. 81. Spezifisches Gewicht des Wassers bei wechselnder Temperatur.

kohols bei 20°, bezogen auf Wasser von 4°, ist also $0{,}9985 \cdot 0{,}810 = 0{,}809$ oder sein spezifisches Gewicht 809 kg/cbm. — Bei Angabe des Relativgewichtes δ pflegt man wohl durch Hinzufügen von Zahlen anzugeben, auf welche Temperaturen sich die Angabe bezieht; so bedeutet $\delta \,{}^{15}_{4}$, es sei die Flüssigkeit bei 15° δ mal so schwer als Wasser von 4°. Bei Angaben in kg/cbm bedarf es stets nur der Angabe einer Temperatur. —

Hiernach ist es gleichgültig, ob man bei einer Messung das Volumen oder das Gewicht bestimmt; man mißt dasjenige von beiden, welches bequemer oder sicherer zu messen ist, und kann die andere Angabe, braucht man sie, daraus berechnen. Das spezifische Gewicht γ kann man dabei Tabellenwerken entnehmen oder durch eine der weiterhin zu besprechenden Methoden bestimmen.

γ ist indessen von der *Temperatur* abhängig. Der Druck hat bei Flüssigkeiten und festen Körpern wenig Einfluß, § 19. Die Längenänderung für 1° Temperaturzunahme, gegeben in Bruchteilen der ursprünglichen Länge, heißt Wärmeausdehnungskoeffizient α. Eine Fläche nimmt bei 1° Temperaturzunahme um das Doppelte, der Raum-

inhalt um das Dreifache von α zu. Die kubische Ausdehnungszahl ist $\sim 3\,\alpha$. Entnimmt man das spezifische Gewicht γ_0 einer Flüssigkeit bei einer Normaltemperatur dem Tabellenwerk, so ist das spezifische Gewicht bei einer um Δt höheren Temperatur $\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + 3\alpha \cdot \Delta t}$.

Weil bei Flüssigkeiten immer die dreifache Ausdehnungszahl in Frage kommt, so gelangt man bald an jene Grenze, wo man die Wärmeausdehnung nicht vernachlässigen darf. Will man etwa beim Abkühlungsversuch an einer Kühlanlage die Solemenge feststellen, die sich in der eisernen Verdampferkufe befindet, so mißt man nach, wie tief die Sole in der Kufe steht. Man tut das zur Sicherheit vor und nach dem Versuch; das zweitemal ist aber die Temperatur niedriger — eine Folge des Arbeitens der Kältemaschine. Die Grundfläche der Kufe sei vor dem Versuch F (laut Werkzeichnung), nachher wegen der Abkühlung nur f; die gemessenen Standhöhen der Sole seien H und h, das Volumen der Sole sei V und v. Dann ist $V = H \cdot F$ und $v = h \cdot f$; weiter ist $F = f \cdot (1 + 2\,\alpha_1)$ und $V = v \cdot (1 + 3\,\alpha_2)$, wobei $2\,\alpha_1 = 2 \cdot 0{,}000012$ die quadratische Ausdehnungszahl des Eisens, $3\,\alpha_2 = 0{,}0004$ die kubische der Sole ist. Dann wird also $\frac{H}{h} = \frac{V}{v} \cdot \frac{f}{F} = \frac{1{,}0004}{1{,}000024}$ $= 1{,}00037$; $H = 1{,}00037 \cdot h$. Das gilt für 1° Temperaturunterschied: die Standhöhen in der Kufe werden bei 20° Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Versuches um $^2/_3$% voneinander abweichen. Bei 2 m Tiefe findet man einen Unterschied von 13 mm zwischen beiden Messungen.

Bei warmem Wasser darf man das spezifische Gewicht nicht $\gamma = 1$ oder $\gamma = 1000$ kg/cbm setzen; bei 70° Temperatur wäre der Fehler bereits über 2%! Bei kaltem Wasser hat freilich die Temperatur wenig Einfluß, weil die Änderungen in der Nähe des Maximums bei 4° klein sind. Das zeigt Fig. 81, welche die Abhängigkeit des spezifischen Gewichts von der Temperatur darstellt. Wasser nimmt in dieser Hinsicht bekanntlich eine Ausnahmestellung ein.

44. Reduziertes und unreduziertes Volumen bei Gasen. Einfluß der Feuchtigkeit. Bei Gasen pflegt man die Angabe der Menge selten nach Kilogrammen zu machen. Wohl aber reduziert man die Volumenangaben auf die Normalspannung von 760 mm Quecksilbersäule und auf die Normaltemperatur von 0° C. Es ist zweckmäßig, stets anzudeuten, wenn ein Volumen auf Normalverhältnisse reduziert ist, indem man hinter die Benennung den Zusatz $\binom{0°}{760\text{ mm}}$ setzt, oder einfach $\binom{0}{760}$. Die Angabe des reduzierten Volumens ist einer Gewichtsangabe völlig gleichwertig, denn für trockene Luft ist ja beispielsweise 1 cbm $\binom{0}{760}$ $= 1{,}293$ kg eine feste Beziehung.

Wo man also Wassermengen nach Volumen angibt, muß man Luftmengen unreduziert lassen; wo man Wassermengen nach Gewicht angibt, muß man Luftmengen reduzieren — hierüber noch im nächsten Paragraphen weiteres.

Für die Reduktion selbst gilt die Formel (Gesetz von Mariotte und Gay-Lussac):

$$\text{reduziertes spezif. Gewicht } \gamma_0 = \gamma \cdot \frac{273+t}{273} \cdot \frac{760}{p} = 2{,}78 \cdot \gamma \cdot \frac{T}{p} \quad . \quad . \quad (4)$$

$$\text{oder reduziertes Volumen } V_0 = V \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{p}{760} = 0{,}359 \cdot V \cdot \frac{p}{T} \quad . \quad (5)$$

worin γ und V die nicht reduzierten beobachteten Werte, t die bei der Beobachtung herrschende Temperatur in Celsiusgraden, $T = 273 + t$ die absolute Temperatur (S. 316) und p der dabei herrschende absolute Druck (häufig der Barometerstand) in mm QuS ist.

In neuerer Zeit wird auch wohl die Reduktion auf die Spannung von 1 at = 1 kg/qcm = 735,5 mm QuS (S. 50) und auf die Temperatur von 15° C angewendet; auch diese Angabe ist einer Gewichtsangabe gleichwertig; für trockene Luft ist 1 cbm $\binom{15}{735} = 1{,}186$ kg. Bei Annahme dieses Normalzustandes würde

$$\text{reduziertes spezif. Gewicht } \gamma_1 = \gamma \cdot \frac{273+t}{273+15} \cdot \frac{735{,}5}{p} = 2{,}55 \cdot \gamma \cdot \frac{T}{p} \quad (4a)$$

$$\text{oder reduziertes Volumen } V_1 = V \cdot \frac{273+15}{273+t} \cdot \frac{p}{735{,}5} = 0{,}392 \cdot V \cdot \frac{p}{T} \quad (5a)$$

Die Angaben in den beiden Normalzuständen verhalten sich $V_1 : V_0 = \gamma_0 : \gamma_1 = 1 : 0{,}925$ oder $V_0 : V_1 = \gamma_1 : \gamma_0 = 1 : 1{,}08$.

Es sei dazu bemerkt, daß es an sich gleichgültig ist, auf welchen Normalzustand man sich bezieht, da durch die Bezugnahme nur die Schwankungen der Temperatur und des Barometerstandes ausgeschaltet und Vergleiche ermöglicht werden sollen. Für die neuere Annahme spricht nur die Tatsache, daß im allgemeinen die Fehler kleiner werden, wenn man die Reduktion vorzunehmen unterläßt in Fällen, wo man sie hätte vornehmen müssen (§ 45). Das ist ein recht äußerlicher Vorteil. Entgegenzuhalten ist, daß nun Verwechselungen bei Zahlenangaben um so leichter entstehen können, da die Einführung des neuen Normalzustandes auch in der Physik aussichtslos ist, da man wegen der Thermometerskala von dem normalen Barometerstand doch nicht ganz loskommt, und da viele Tabellenwerke an Wert verlieren — alles, ohne daß eine sachliche Verbesserung erreicht wird.

Als *Beispiel* einer Reduktion diene folgende Rechnung: An einer Gasmaschine wurde der Leuchtgasverbrauch zu 26,2 cbm/st gemessen, mittels einer Gasuhr, an der man die Gastemperatur mit 19° und den Gasüberdruck mit 42 mm WS ablas. Ein Quecksilberbarometer zeigte 749 mm, bei einer Temperatur des Quecksilbers von 18°; der Barometerstand ist also (Fig. 38, S. 56) mit $0{,}996 \cdot 749 = 746$ mm QuS in Ansatz zu bringen. — 42 mm WS sind gleich $\frac{42}{13{,}5} = 3$ mm QuS; das Gas hatte also bei der Messung $746 + 3 = 749$ mm QuS Druck und $273 + 19 = 292°$ absolute Temperatur. Also ist das reduzierte Vo-

lumen — und dieses ist für die Beurteilung des Brennstoffverbrauches maßgebend —

$$V_0 = 0{,}359 \cdot 26{,}2 \cdot \frac{749}{292} = 24{,}1 \text{ cbm } \left(\tfrac{0}{760}\right).$$

Nach der anderen Rechnungsweise aber wäre

$$V_1 = 0{,}392 \cdot 26{,}2 \cdot \frac{749}{292} = 26{,}3 \text{ cbm } \left(\tfrac{15}{735}\right).$$

Im *englischen Maßsystem* reduziert man die Gasmengen auf 30 Zoll QuS = 761,99 mm QuS und auf 32° Fahrenheit = 0° C.

Einfluß auf das spezifische Gewicht der Gase hat die in ihnen enthaltene *Feuchtigkeit*. Wasserdampf ist nämlich nur reichlich halb so schwer wie Luft. Wie groß der Fehler ist, den man durch Nichtbeachtung der Feuchtigkeit begeht, dafür geben folgende *Beispiele* einen Anhalt, bei denen man sich des Gesetzes von Dalton erinnern möge.

Temperatur 20°. Barometerstand 750 mm, d. i. Spannung der Luft plus der des in ihr enthaltenen Wasserdampfes. Trockene Luft wiegt $1{,}293 \cdot \frac{750}{760} \cdot \frac{273}{273+20} = 1{,}189 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$. Mit Feuchtigkeit gesättigte enthält bei dieser Temperatur im Kubikmeter (Dampftabellen) 0,017 kg Dampf. Dabei ist die Dampfspannung (Dampftabellen) 17 mm Qu., also bleiben 750 — 17 = 733 mm QuS Luftspannung. Die in dem Kubikmeter enthaltene Luft wiegt daher $1{,}293 \cdot \frac{273}{273+20} \cdot \frac{733}{760}$ = 1,162 kg/cbm. Die feuchte Luft als Ganzes wiegt also 1,162 + 0,017 = 1,179 kg/cbm. Fehler bei Nichtberücksichtigung der Feuchtigkeit 0,85%. Hätte die Luft 50% Feuchtigkeit enthalten, so hätte sie 1,184 kg/cbm gewogen.

Temperatur 50°. Barometerstand 760 mm. Trockene Luft wiegt 1,093 kg/cbm. In gesättigt feuchter wöge der Dampf 0,083 kg/cbm bei 92 mm Spannung; die Luft wöge bei 668 mm Spannung 0,961 kg/cbm. Gesättigt feuchte Luft wöge 1,044 kg/cbm, mittelfeuchte 1,068 kg/cbm. Fehler durch Vernachlässigen der Feuchtigkeit $\sim$ 5% bei gesättigter, 2,5% bei mittelfeuchter Luft!

Bei warmer Luft ist eine Vernachlässigung der Feuchtigkeit unzulässig. Man muß also die Luftfeuchtigkeit bestimmen (Psychrometer, § 106), oder man rechne im Notfall mit mittelfeuchter Luft. Eine Tabelle für feuchte Luft findet sich Hütte, 21. Aufl., I, S. 422.

45. Wann Gewicht, wann Volumen angeben? Wir haben gesehen, daß man Gewicht und Volumenangaben leicht ineinander überführen kann. Es fragt sich nun, wann man Angaben nach Gewicht, wann nach Volumen machen sollte. Für Gase ist die Frage die, wann man das Volumen auf Normaldruck und -temperatur reduzieren soll, wann nicht. Eine Umrechnung auf Gewicht und auf reduziertes Volumen ist nicht immer das richtige, wie man vielfach meint.

Bei der Untersuchung einer *Pumpe* kommt es darauf an, ob dieselbe das Wasser auf eine gewisse Förderhöhe, in Metern gemessen, hebt oder

ob sie es gegen eine gewisse in Atmosphären gemessene Spannung, in einen Akkumulator, in einen Dampfkessel hineinspeist. Im ersten Fall ist das geförderte Gewicht, im zweiten das Volumen für den Arbeitsbedarf der Pumpe maßgebend. Die Dimensionsformel besagt das: $1000\,\text{kg} \times 10\,\text{m} = 10000\,\text{m} \cdot \text{kg}$; aber $1\,\text{cbm} \times 1\,\text{at} = 1\,\text{m}^3 \cdot 10000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ $= 10000\,\frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}{\text{m}^2} = 10000\,\text{m} \cdot \text{kg}$. Bei Förderung von Alkohol wird man hier kaum einen Fehler machen, weil man aufmerksam wird; aber bei warmem Wasser können Fehler von 2% und mehr unterlaufen. Untersucht man also die Kesselspeisepumpe auf ihren Arbeitsbedarf, so hat man die gespeiste Wassermenge in Kubikmetern anzugeben, obwohl für die Leistung des Kessels das hineingespeiste Wassergewicht maßgebend ist.

Die Verhältnisse treten noch klarer hervor beim *Ventilator*, einer Maschine also, die Luft in einen Raum gewissen Druckes zu fördern hat und die daher ein Analogon zur Pumpe ist. Man hat auch hier, zur Berechnung der erforderlichen Leistung, entweder so zu rechnen, daß ein gewisses Volumen gegen einen gewissen Gegendruck aus dem Ventilator herausgeschoben werden muß, oder aber so, als ob ein gewisses Luftgewicht auf eine in Metern Luftsäule anzugebende Höhe gehoben werde. Beide Rechnungsweisen führen, korrekt durchgeführt, zu genau gleichem Ergebnis, wie folgendes Beispiel zeigt. Ein Ventilator habe ein Luftvolumen von 0,42 kg/sek gegen 182 mm WS $= 182\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}}$ gefördert; diese beiden Angaben sind direkt gemessen, außerdem sei noch das spezifische Gewicht der Luft, folgend (§ 44) aus Druck, Temperatur und Feuchtigkeit, zu 1,20 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ festgestellt. Dann ist die theoretisch erforderliche Arbeit entweder so zu berechnen: $0{,}42\,\frac{\text{kg}}{\text{sek}} = \frac{0{,}42}{1{,}20} = 0{,}35\,\frac{\text{cbm}}{\text{sek}}$, also die Leistung $0{,}35\,\frac{\text{cbm}}{\text{sek}} \times 182\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}} = 63{,}7\,\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}} = \frac{63{,}7}{75} \backsim 0{,}85$ PS; oder man rechnet so: Da Wasser (kalt) das spezifische Gewicht $1000\,\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ hat und Wasser- und Luftsäule dann einander äquivalent sind, wenn ihre Höhen sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte verhalten (Gesetz der kommunizierenden Röhren), so sind 182 mm WS $= 182 \cdot \frac{1000}{1{,}20}$ $= 151\,700$ mm LS $= 151{,}7$ m LS; also sind $0{,}42\,\frac{\text{kg}}{\text{sek}}$ um 151,7 m zu heben, entsprechend einem Arbeitsaufwand von $0{,}42\,\frac{\text{kg}}{\text{sek}} \times 151{,}7\,\text{m}$ $= 63{,}7\,\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}}$. — Daß die genaue Übereinstimmung beider Ergebnisse nicht nur Zufall ist, wird ein Vergleich beider Wege zeigen: beidemal ist $\frac{0{,}42 \cdot 182}{1{,}20} = 63{,}7$.

Ein bestimmtes *Gebläse* saugt immer das gleiche Luftvolumen an, es stehe in der Ebene, wo der Barometerstand 760 mm QuS ist,

oder im Gebirge bei 760 mm Barometerstand, es arbeite im Sommer oder im Winter. Für Beurteilung der Zylinderkonstruktion, etwa bei Bestimmung des volumetrischen Wirkungsgrades, kommt es also auf das angesaugte Volumen an, und es wäre falsch, auf Normalverhältnisse zu reduzieren. Das Gebläse würde sonst in der Ebene andere Ergebnisse liefern als im Gebirge; im tiefen Bergwerk arbeitend, oder an Tagen mit ausnahmsweise hohem Barometerstand könnte man selbst volumetrische Wirkungsgrade über Eins errechnen. Handelt es sich aber darum, zu prüfen, ob das Gebläse der vorgeschriebenen Bedingung genügt, die nötige Luft für einen chemischen Prozeß zu liefern, der natürlich ein bestimmtes Luftgewicht erfordert, zu prüfen also, ob der Konstrukteur die Zylinderabmessungen genügend groß wählte, da er ja wußte, der Kompressor würde bei geringem Barometerstand oder bei hoher Temperatur arbeiten und da er den erreichbaren volumetrischen Wirkungsgrad kannte — handelt es sich darum, so wird man auf die Normalverhältnisse reduzieren müssen.

Ähnliche Überlegungen sind, je nach den Verhältnissen, von Fall zu Fall anzustellen. Die Stoffmenge selbst, die Masse im Sinne der Physik, ist natürlich immer durch das Gewicht oder durch das reduzierte Volumen gegeben.

46. Spezifisches Gewicht von Flüssigkeiten. Bei *festen Körpern* kann man das spezifische Gewicht meist Tabellenwerken entnehmen. Kommt man in die Verlegenheit, es zu bestimmen, so werden Physikbücher Anleitung geben.

Fig. 82. Aräometer.

Bei *Flüssigkeiten* bestimmt man das spezifische Gewicht mit Hilfe des *Aräometers*. Dieses (Fig. 82) besteht meist aus Glas, der weite Bauch ist hohl, um Schwimmen zu ermöglichen, das Kügelchen unten ist mit Quecksilber oder sonstwie beschwert, um die senkrechte Lage zu sichern. Das Instrument taucht in die Flüssigkeit um so tiefer ein, je leichter die Flüssigkeit, je kleiner also ihr Auftrieb ist. Aus der Eintauchtiefe kann man mittels einer Skala in dem langen Rohrfortsatz auf das spezifische Gewicht schließen. — Um die Skala nicht zu lang zu erhalten, hat man für Flüssigkeiten von höherem und geringerem Gewicht als Wasser besondere Instrumente, verteilt auch wohl, um größere Genauigkeit zu erzielen, den Meßbereich auf noch mehr als zwei Instrumente.

Jedes Aräometer ist richtig bei einer bestimmten darauf angegebenen Temperatur, meist 15° C. Man darf, genau genommen, es nur bei dieser benutzen, da nicht nur die Flüssigkeit, sondern auch das Instrument sich mit der Temperatur ausdehnt; man müßte es also besonders für jede Temperatur eichen. Ein Aräometer mit der Bezeichnung „richtig bei 15° C" darf also im Wasser von 15° C nicht die Dichte 1, das spezifische Gewicht 1000 kg/cbm anzeigen, es muß sich, nach Fig. 81, auf $\gamma = 999$ kg/cbm einstellen. Wollte man es aber in Wasser von 4° bringen, so würde es auch hier nicht 1000 kg/cbm zeigen, denn nun hätte sich das Aräometer selbst im Inhalt verkleinert und zeigt daher das spezifische Gewicht zu gering an. — Allerdings ist die Ausdehnung des

Glases (lineare Ausdehnungszahl $\alpha = 0{,}000\,008$, also Raumausdehnung $3\alpha = 0{,}000\,024$) klein gegen die der meisten Flüssigkeiten (Benzol $3\alpha = 0{,}00125$, Petroleum $3\alpha \sim 0{,}0017$, Glyzerin $3\alpha = 0{,}0005$); solange also nicht durch die Temperaturänderung Deformationen der Körpergestalt eintreten, wird man für die meisten Zwecke annehmen können, bei anderen als der Normaltemperatur des Instrumentes gebe dieses das spezifische Gewicht der Flüssigkeit bei der herrschenden Temperatur richtig an. Selbst bei einer um 10° falschen Temperatur (also + 5° statt + 15°) wäre dieser Fehler erst 0,000 24, während das spezifische Gewicht selbst der Größenordnung nach stets nahe der Einheit liegt, so daß der relative Fehler erst etwa $^1/_{40}\%$ ausmacht — sofern man das spezifische Gewicht selbst sucht, z. B. zur Berechnung des verbrauchten Brennstoffgewichtes aus dem gemessenen Volumen bei einem Ölmotor.

Die Hauptanwendung der Aräometer ist aber die Bestimmung der Zusammensetzung von Lösungen, etwa des Wassergehalts von Alkohol, des Salzgehalts einer Kochsalzlösung — wozu dann wieder Umrechnungstabellen passenden Orts zu finden sind. Da nun z. B. für stärkeren Alkohol einer Änderung des Alkoholgehalts um 1% eine Änderung des spezifischen Gewichts um 0,35% entspricht, so ergibt jeder Fehler in der Messung des spezifischen Gewichts einen $3^1/_2$ mal so großen in der Berechnung des Alkoholgehaltes und damit des Heizwertes. Auch der Fehler aus der Volumänderung des Aräometers wird dann (für 10° Temperaturabweichung) $^1/_{13}\%$ ausmachen, also immerhin beachtlich werden.

Wo in der Industrie — wenig zweckmäßig — Aräometer verwendet werden, die in Grade geteilt sind, da gilt zwischen der Anzahl n der abgelesenen Grade und der Dichte δ (bei 15°) die Beziehungen:

für Flüssigkeiten leichter als Wasser:

$$\delta = \frac{a}{a+n}; \quad n = \frac{a}{\delta} - a,$$

für Flüssigkeiten schwerer als Wasser:

$$\delta = \frac{a}{a-n}; \quad n = a - \frac{a}{\delta}.$$

Hierin ist nach der Skala von Baumé $a \sim 146$, nach der Skala von Brix $a \sim 400$. Der genaue Wert richtet sich nach der Meßtemperatur und nach der Bezugstemperatur; eine Umrechnung bei Abweichungen von der Solltemperatur wird umständlich. Vergleiche etwa Lunge, Chemisch technische Untersuchungsmethoden I, 154; Lunge, Taschenbuch f. d. Sodaindustrie. 3. Aufl., 281.

Man findet das spezifische Gewicht auch aus dem Gewichtsunterschied eines Sinkkörpers in Wasser und in der betreffenden Flüssigkeit; oder aus einem Vergleich des in ein Meßgefäß einzufüllenden Wasser- und Flüssigkeitsgewichts. In jedem Fall ist für gleiche Temperatur zu sorgen, oder es gelten bei Abweichungen der Temperatur die gleichen Überlegungen hinsichtlich der Volumänderung des Wassers, der Flüssigkeit und des Sinkkörpers oder des Meßgefäßes.

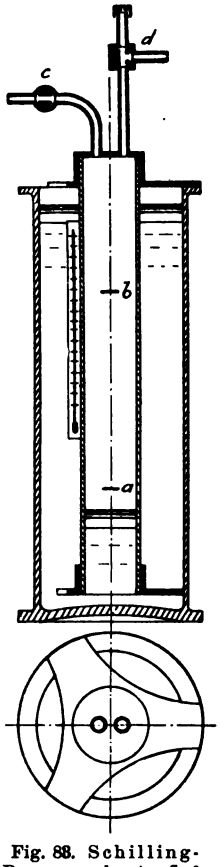


Fig. 88. Schilling-Bunsenscher Ausflußapparat.

47. Spezifisches Gewicht von Gasen. Auch bei Gasen ist die Bestimmung des spezifischen Gewichts oft nicht Selbstzweck; man will vielmehr aus dem spezifischen Gewicht etwa auf den CO_2-Gehalt der Rauchgase, auf den Heizwert von Leuchtgas schließen, weil diese ungefähr aus dem spezifischen Gewicht bestimmbar sind.

Gerne gibt man das spezifische Gewicht, korrekter gesagt, die Dichte der Gase bezogen auf trockene Luft = 1 an. Trockene Luft wiegt bei 0° und 760 mm BStd. 1,293 kg/cbm. Ein Gas von der Dichte 0,9 wiegt also (bei 0° und 760 mm BStd.) 1,293 · 0,9 kg/cbm. Die Bezugnahme auf Luft hat den Vorteil, daß die Angabe unabhängig ist von Druck und Temperatur, weil alle Gase nach dem gleichen Gesetz, dem Mariotte-Gay Lussacschen, von Druck und Temperatur beeinflußt werden. Da Dämpfe nicht genau dem gleichen Gesetz folgen, so hat bei ihnen die Bezugnahme auf Luft weniger Vorteil, man muß bei genauen Rechnungen trotzdem Druck und Temperatur beachten.

Im *Schilling-Bunsenschen Ausflußapparat* (Fig. 83) findet man das spezifische Gewicht eines Gases auf folgende Weise. Der Apparat ist mit Wasser gefüllt, er besteht aus Glas mit Metallfassungen. Das innere Rohr kann man heben und senken, man kann also unter Benutzung der Hähne *c* und *d* abwechselnd durch *c* hindurch Gas ansaugen und durch *d* ausstoßen, bis die an *c* angeschlossene Gasleitung voll Gas, frei von Luft ist. Dann füllt man das innere Gefäß mit Gas und schließt beide Hähne. Öffnet man nun Hahn *d* so, daß das Gas unter dem Druck der Wassersäule durch ein feines Loch ausströmt, welches sich in einem oberhalb *d* eingelegten Platinblech befindet, so kann man mittels einer Stechuhr die Zeit feststellen, die zwischen dem Durchgang des Wasserspiegels durch die beiden Marken *a* und *b* verfließt. Ein zweites Mal füllt man den Apparat mit

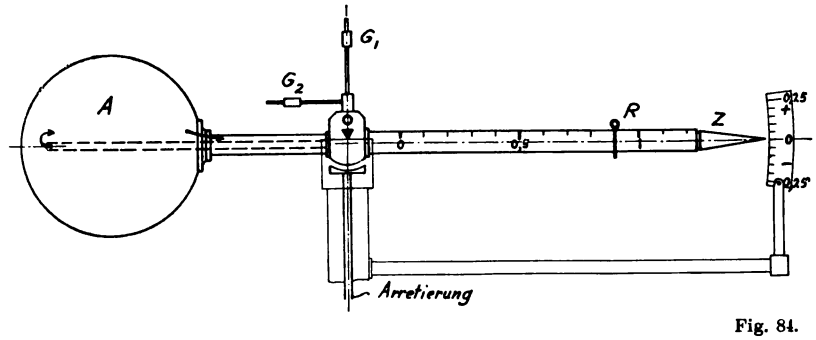
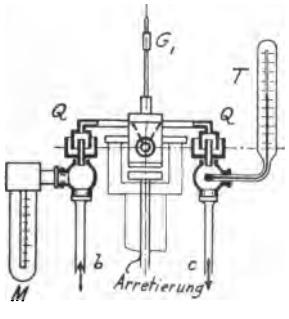


Fig. 84.

Luft, läßt diese ausströmen und beobachtet wieder die Zeit zwischen dem Passieren der beiden Marken. Die beiden spezifischen Gewichte verhalten sich dann wie die Quadrate der Ausströmungszeiten. Das folgt daraus, daß bei beiden Versuchen während der Beobachtungszeit die gleiche Arbeit durch Ausgleichen der Wasserspiegel frei wird, daher muß auch die dem Gase erteilte kinetische Energie $\frac{1}{2} m w^2$ beide Male den gleichen Wert haben. Es ist also $\frac{1}{2} m_1 w_1^2 = \frac{1}{2} m_2 w_2^2$ oder $\frac{m_1}{m_2} = \frac{w_2^2}{w_1^2}$. Die beschleunigten Massen m sind den spezifischen Gewichten γ der Gase direkt, die Geschwindigkeiten w den Beobachtungszeiten t umgekehrt proportional, also ist $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$.

Der Apparat ist ursprünglich von Bunsen für Quecksilberfüllung angegeben. Durch Temperaturänderungen ändern sich die Verhältnisse am Apparat, man muß also beide Versuche bei der gleichen Temperatur vornehmen. Auch ist es nicht zulässig, den Versuch mit Luft ein für allemal zu machen, man muß beide Versuche kurz hintereinander machen, da das kleine Loch sich leicht etwas verändert. Man staube es vor den Versuchen ab.

Die Luxsche *Gaswage* (Fig. 84) läßt das spezifische Gewicht ohne Versuch direkt ablesen. Das Gas durchströmt die hohle dünnwandige Glas- oder Metallkugel A, durch b ein-, durch c austretend. Der Ballon ist als Teil einer Neigungswage auf Schneiden gelagert, je nach dem spezifischen Gewicht seines Inhaltes hebt oder senkt er sich. Die freie Beweglichkeit ist durch Zuführung des Gases durch Quecksilbernäpfe Q hindurch erreicht. Das bewirkt einen Ausschlag des Zeigers Z, die Skala gibt direkt das spezifische Gewicht bezogen auf die umgebende Luft. Werden die Neigungen zu groß, so kann man sich noch des Reiters R bedienen, den man je nach Bedarf in verschiedene Kerbe des Wagebalkens einhängt. Man hat dann die Reiterablesung und die Zeigerablesung zusammenzuzählen, um das spezifische Gewicht des durchströmenden Gases zu erhalten. Läßt man einfach Luft durch den Apparat gehen, so muß, wenn der Reiter auf 1,0 steht, der Zeiger auf 0 weisen: $1{,}0 + 0 = 1{,}0$, das ist ja die Dichte der Luft, bezogen auf sich selbst. Spielt der Zeiger nicht ein, so ist durch Verschieben des Laufgewichtes G_2 im wagerechten Sinne das Einspielen zu erzielen. Setzen wir nun den Reiter auf 0,8, so muß der Zeiger + 0,2 angeben: $0{,}8 + 0{,}2 = 1{,}0$. Zeigt das Instrument nicht so, so ist mit dem Laufgewicht G_1 die Empfindlichkeit der Wage auf das richtige Maß zu bringen: ist der Ausschlag der Wage kleiner, als er sein sollte, so ist das Gewicht zu heben, um sie mehr dem labilen Zustand zu nähern. Manometer M und Thermometer T lassen Druck und Temperatur des strömenden Gases erkennen. Die Gaswage muß natürlich wagerecht stehen, außerdem



Gaswage.

lange genug vor ihrer Benutzung aufgestellt sein, so daß sie die Temperatur der Umgebung hat. — Hat die Kugel A V cbm Inhalt und beträgt das spezifische Gewicht des Inhaltes γ_1, das der umgebenden Luft γ kg/cbm, so erfährt die Kugel einen Auftrieb von $V \cdot (\gamma - \gamma_1)$ kg, vorausgesetzt, es sei γ größer als γ_1. Dieser Auftrieb wird durch den Reiter ausgeglichen, beziehungsweise er bewirkt die Neigung des Wagebalkens. Die Gaswage spricht also auf den Unterschied der spezifischen Gewichte an. Wenn die Gaswage in einen Kasten eingeschlossen ist, so hat man darauf zu achten, daß nicht etwa Spuren des zu untersuchenden Gases in den Raum um die Gaswage herum treten und das spezifische Gewicht der umgebenden Luft und damit die Angabe der Wage verändern. Die Gaswage eignet sich mehr für stationäre Zwecke, während der Ausflußapparat für die Reise bequemer ist.

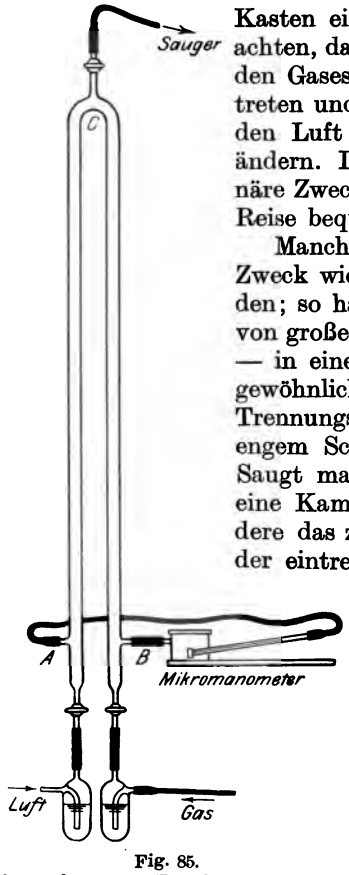


Fig. 85.
Gassäulenwage. (Rauchgasanalysator von Krell, S. 386.)

Manche andere Form der Wage ist zu gleichem Zweck wie die Luxsche Gaswage verwendet worden; so hat man zwei leichte luftgefüllte Kugeln von großem Volumen — 10 bis 15 cm Durchmesser — in einem Gehäuse an den beiden Armen einer gewöhnlichen Balkenwage aufgehängt, wobei eine Trennungswand, durch die nur der Wagebalken in engem Schlitz hindurchging, das Gehäuse teilte. Saugt man nun in schwachem Strome durch die eine Kammer des Gehäuses Luft, durch die andere das zu untersuchende Gas, so kann man aus der eintretenden Neigung des Balkens oder aus den zum Ausgleich nötigen Gewichten auf den Auftrieb und damit auf die Dichte des Gases schließen.

Besonders zu erwähnen ist aber noch die Messung des spezifischen Gewichtes durch Vergleichen des Gewichtes zweier Säulen aus dem zu untersuchenden Gas und aus Luft. Die *Gassäulenwage* besteht aus einem gegabelten, senkrecht aufgestellten Rohr (Fig. 85) aus Glas oder Metall, von mindestens 1 m Länge. Oben wird, etwa durch eine Wasserstrahlpumpe oder einen Aspirator, oder aber durch den Schornsteinzug — wenn man nämlich Rauchgase untersucht, also in der Nähe des Schornsteins sich befindet — eine saugende Wirkung ausgeübt und daher durch die beiden Rohre einerseits Luft, andererseits das zu untersuchende Gas eingesaugt. Wenn man dann die Abzweigrohre A und B, die in gleicher Höhe, und zwar um h m unter der Vereinigung C beider Gasströme ansetzen, mit den beiden Seiten eines Differentialmanometers von genügender Empfindlichkeit in Verbindung bringt, so kann man

einen Druckunterschied zwischen den beiden Stellen A und B messen. Es nimmt ganz allgemein in jedem Gase oder jeder Flüssigkeit der Druck nach unten hin zu, und zwar um γ kg/qm $= \gamma$ mm WS (S. 50) für jedes Meter Standhöhe, wenn das spezifische Gewicht des Mediums γ kg/cbm ist; man erkennt das am einfachsten, wenn man an einen Würfel von 1 m Seitenlänge denkt, dessen untere Grundfläche von 1 qm Größe offenbar mit γ kg mehr belastet ist als die obere, nämlich noch mit dem Gewicht γ des Würfelinhaltes. Wenn nun in den beiden Rohren AC und BC Säulen vom spezifischen Gewichte γ und γ_1 kg/cbm stehen, so ist der Druck bei A um $\gamma \cdot h$ mm WS und der bei B um $\gamma_1 \cdot h$ mm WS größer als der beiden Rohrzweigen gemeinsame Druck in C. Der Druckunterschied $\Delta p = h \cdot (\gamma_1 - \gamma)$ läßt den Unterschied des spezifischen Gewichtes berechnen: $\gamma_1 - \gamma = \frac{\Delta p}{h}$. Kennt man also γ_1 der angesaugten Luft, so kennt man auch γ des Gases. Als Differentialmanometer kommt der Empfindlichkeit wegen fast nur ein Mikromanometer (§ 27, S. 61, Fig. 49) in Frage. — Da stets in die Zuleitungen von den Zweigpunkten A und B zum Differentialmanometer etwas von den angesaugten Gasen durch Diffusion eintreten wird, so muß man für wagerechten Verlauf dieser Zuleitungen sorgen; sonst bringt das verschiedene spezifische Gewicht des Inhaltes der Zuleitungen Fehler in die Messung. Außerdem müssen die beiden Rohre AC und BC genügend weit sein, damit in ihnen nur eine langsame Bewegung der Gase erfolgt; sonst können durch den dynamischen Widerstand der Leitungen, wenn nämlich beiderseits verschiedene Gasmengen angesaugt werden, und durch Wirbelung des strömenden Gases an den Entnahmestellen A und B Fehler entstehen (§ 42, S. 96). Um zu erkennen, ob beide Rohre richtig und gleich stark ansaugen, kann man die Gase durch Wasserverschlüsse leiten, wie Fig. 85 erkennen läßt; Gaswäscher nennt der Chemiker diese kleinen Apparate. —

Zu beachten ist bei allen besprochenen Apparaten, daß sie das spezifische Gewicht des zu untersuchenden Gases vergleichen mit dem spezifischen Gewicht der Luft. Da nun aber das spezifische Gewicht beider von Druck, Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt abhängt, so wird auch das Meßergebnis durch diese Größen beeinflußt.

Außerdem ist zu beachten, daß manche Meßmethoden den *Unterschied*, manche aber das *Verhältnis der spezifischen Gewichte* von Gas und Luft messen. Von den besprochenen Einrichtungen mißt nur der Bunsen Schillingsche Ausströmapparat das Verhältnis, die übrigen die Differenz.

Wenn wir zunächst von dem nach S. 104 geringen Einfluß der Feuchtigkeit auf das spezifische Gewicht absehen, so ist zu beachten, daß Änderungen des Druckes und der Temperatur auf die beiden zu vergleichenden spezifischen Gewichte relativ gleich stark einwirken, daß also das Verhältnis beider erhalten bleibt, der Unterschied aber sich ändert. Das macht bei den Instrumenten, die auf den Unterschied des spezifischen Gewichtes ansprechen, eine *Umrechnung auf normale Verhältnisse* nötig.

Ist also wie üblich die Teilung der Gaswage oder die Teilung des Differentialmanometers der Gassäulenwage in Relativgewicht für Luft

gleich Eins ausgeführt, so gilt die Teilung nur für einen bestimmten Druck und eine bestimmte Temperatur, die beide Gase beim Messen haben müßten. Oft wird 15° C und 760 mm Barometerstand als normal gewählt. Hätte man dann bei einer Temperatur von $t = 20°$ C und bei einem Barometerstand von $b = 710$ mm eine Ablesung $\delta' = 0{,}461$ (etwa für Leuchtgas) gemacht, so wäre die Berechnung des Relativgewichtes δ des Leuchtgases wie folgt durchzuführen: Der Zeiger (oder der Faden des Differentialmanometers) ist bei 1 in Ruhe, er hat also einen Ausschlag $1 - \delta'$ gemacht, statt daß er $1 - \delta$ hätte machen sollen; diese beiden Ausschläge verhalten sich zueinander wie der Unterschied $\gamma_1' - \gamma'$ der spezifischen Gewichte der beiden Gase im tatsächlichen Zustand zu dem Unterschied $\gamma_1 - \gamma$ derselben im Normalzustand; diese Unterschiede verhalten sich ihrerseits wie die spezifischen Gewichte $\gamma_1' : \gamma_1$ der Luft oder auch wie $\gamma' : \gamma$ von Gas in den beiden Zuständen, und diese wiederum folgen den Gesetzen von Mariotte und Gay-Lussac. Also haben wir:

$$\frac{1-\delta}{1-\delta'} = \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma_1' - \gamma'} = \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{273+t}{273+15} \cdot \frac{760}{b} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1'} = \frac{273+20}{273+15} \cdot \frac{760}{710}$$

oder den richtigen Wert der Gasdichte, bezogen auf Luft gleich Eins:

$$\delta = 1 - (1-\delta') \cdot \frac{273+t}{273+15} \cdot \frac{760}{b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

$$= 1 - (1 - 0{,}461) \frac{273+20}{273+15} \cdot \frac{760}{710} = 0{,}414\,.$$

Der Fehler bei Nichtbeachtung dieser Verhältnisse hätte $\frac{0{,}461 - 0{,}414}{0{,}414} \cdot 100 = 11{,}4\%$ betragen! Man darf also eine Korrektion bei größeren Abweichungen vom Sollzustand nicht unterlassen, zumal wenn es sich um sehr leichte oder sehr schwere Gase handelt, bei denen durch das Subtrahieren von Eins der Unterschied groß ausfällt.

Übersichtlicher ist es übrigens, den Balken der Gaswage gleich nach der Differenz der spezifischen Gewichte zwischen innen und außen zu teilen, also der Wirksamkeit der Wage entsprechend.

Während diese große Korrektion relativ leicht anzusetzen ist, ist eine genaue Berücksichtigung der Feuchtigkeit schwierig. Wasserdampf hat, auf gleiche Temperatur und gleichen Druck bezogen, eine Dichte bezogen auf Luft, die zwischen 0,62 und 0,68 schwankt. Durch Hinzutreten der Feuchtigkeit wird also Luft spezifisch leichter, Leuchtgas hingegen spezifisch schwerer. Es findet also nicht notwendig eine Verminderung des Fehlers dadurch statt, daß beide Gase feucht sind. Oft wird man den Einfluß, der nie solche Werte wie der der vorigen Korrektion annimmt, vernachlässigen können. Oft wird man, wo man genau arbeiten will und die Bezugnahme auf trockenes Gas für das richtige hält, besser gleich mit trockenem Gas und trockener Luft arbeiten, indem man beide durch Chlorkalziumrohre hindurchsaugt (vorausgesetzt, daß Chlorkalzium nicht Bestandteile des Gases absorbiert). Oder end-

lich, man muß den Feuchtigkeitsgehalt beider Gase messen und eine recht langwierige Umrechnung vornehmen, die man an Hand der Beispiele S. 104 wird machen können und für die man auch in Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozeß das Gasmaschine, S. 11, ein Beispiel durchgerechnet findet[1]).

48. Meßmethoden zur Mengenermittlung. Zur Messung von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen und Dampf der Menge nach kommen die in den folgenden Paragraphen zu besprechenden Methoden technisch hauptsächlich in Frage, über die wir zunächst eine zusammenstellende Übersicht geben wollen.

Wir haben einen Unterschied zu machen, ob es sich um Bestimmung einer bestimmten in sich geschlossenen Menge handelt, oder aber — bei Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen — um strömende Mengen, bei denen die in der Zeiteinheit durch einen Apparat oder eine Leitung gehende Menge gemessen werden soll. Im ersten Fall lautet die Benennung kg, cbm, im letzten aber kg/sek, cbm/st.

Die *Messung einer abgeschlossenen Menge* erfolgt bei festen Körpern fast nur durch Wägen auf Wagen verschiedener Konstruktion; bei Flüssigkeiten kommt außer dem Wägen auch noch das Abmessen in geeichten Gefäßen in Frage; Gasmengen endlich werden nur selten durch Wägen, meist volumetrisch bestimmt, und zwar entweder, indem man das Gas bei konstantem Druck einer Glocke mit Wasserverschluß entnimmt, wobei man die Volumenänderung mißt, oder aber indem man das Gas einem Raum bekannten Volumens entnimmt und dessen Druckänderung beobachtet.

Spezifisch technische Methoden kommen bei *Messung dauernd strömender Flüssigkeits-, Gas- oder Dampfmengen* zur Anwendung. In vielen Fällen kann man Wagen oder geeichte Gefäße in zum dauernden Messen geeigneter Anordnung verwenden; den Dampf mißt man dann meist in Gestalt des daraus gebildeten Kondensates oder als Wasser vor dem Verdampfen. — Außerdem kann man für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe Durchflußöffnungen oder Ausflußöffnungen verwenden: man mißt den Druckunterschied, der nötig ist, um die betreffende Menge durch eine bekannte Öffnung zu treiben; für eine bestimmte Öffnung wächst mit der Menge der Druckunterschied, also kann man aus letzterem auf die Menge schließen. Dieses Prinzip läßt sich mehrfach abändern und führt bei Flüssigkeiten auf Verwendung der Wehrmessungen, bei allen Stoffen aber auf Verwendung der Venturi-Einschnürung. — Eine andere Meßmethode, für Flüssigkeiten und Gase in genügend weitem Querschnitt anwendbar, macht von der Tatsache Gebrauch, daß das durch einen Querschnitt gehende Volumen V cbm gegeben ist durch die Fläche F qm des Querschnittes und die mittlere Geschwindigkeit w m/sek in diesem Querschnitt: $V = F \cdot w$. Man hat also, da man den Querschnitt leicht ausmessen kann, nur noch die Geschwindigkeit nach einer der in Kap. VII besprochenen Methoden zu bestimmen.

[1]) Wegen eines (nicht erheblichen) Fehlers in dieser Rechnung vergleiche Haber, Kohlenwasserstoffe, S. 22.

Einer besonderen Art der Messung dienen die Wassermesser, Gasmesser und Dampfmesser. Sie sollen im allgemeinen nicht nur eine vorübergehende Messung ausführen, sondern dem praktischen Betrieb dienen, und zwar sollen sie zu jeder Zeit die bis dahin insgesamt durchgegangene Menge erkennen lassen, also gewissermaßen selbsttätig ein Zusammenzählen der jeweils durchgehenden Mengen bewirken. Wir werden sehen, daß diese Aufgabe für Wasser- und Gasmesser gelöst ist, daß man indessen bei Dampfmessern ein selbsttätiges Zusammenzählen noch nicht befriedigend erreicht hat, so daß man sich meist darauf beschränkt, den jeweiligen Dampfdurchgang zu registrieren und die Zusammenzählung durch Planimetrieren des Diagramms von Hand zu machen. Dieses Verfahren, das auch für Wasser- und Gasmessung gelegentlich in Frage kommt, hat den Nachteil, Arbeit zu machen, dafür allerdings den Vorteil, daß man nicht nur aus dem Endergebnis die gesamte Menge kennt, sondern durch das Diagramm auch einen Überblick darüber hat, wie sich der Verbrauch über die verschiedenen Zeiten verteilt.

Wo die zu messende Menge durch eine Kolbenmaschine verbraucht oder gefördert wird, bietet auch das Indikatordiagramm der Maschine ein Mittel zur Bestimmung der Menge — freilich eines, das nur für bestimmte Zwecke genügt.

Besondere Schwierigkeiten macht eine befriedigende Messung dann, wenn sehr große Mengen zu messen sind; nicht immer sind so große Meßgeräte verfügbar, auch liegt, wo die Geräte vorhanden sind, eine Schwierigkeit vor, sie zu eichen. Wir wollen zunächst eine allgemein brauchbare Methode kennen lernen, durch die man diese Schwierigkeit gelegentlich umgehen kann.

49. Mengenermittlung nach der Mischungsregel. Zur Messung großer Stoffmengen, die unmittelbar besonders schwierig zu messen sind, kann man sich der sogenannten Mischungsregel bedienen, die sich je nach Umständen in der verschiedensten Weise anwenden läßt. Über die Art der Anwendung werden einige Beispiele am einfachsten Auskunft geben.

Bei *Gasmaschinen* hat man oft Gasuhren zur Messung des Gasverbrauches zur Verfügung, selten dagegen ist eine Luftuhr vorhanden, die auch die *zur Verbrennung zugeführte Luftmenge* zu messen gestattet; die Luftuhr fehlt meist, weil man die Luftmenge für die Kontrolle des regelmäßigen Betriebes nicht zu kennen braucht — Luft kostet ja nichts. Wir können mit Hilfe der Mischungsregel finden, das Wievielfache der Gasmenge an Luft zugeführt ist, indem wir irgendeinen indifferenten Bestandteil vor der Mischung von Gas und Luft und nach der Mischung beider Bestandteile zu Hilfe nehmen: die gesamte Menge dieses indifferenten Bestandteiles kann sich bei der Mischung nicht verändert haben. In dem in Rede stehenden Beispiel — Mischung von Gas und Luft — vergleicht man am besten den prozentualen Sauerstoffgehalt o_1 des Gases vor mit dem o_2 des Gemisches nach der Mischung; den der Luft kennt man, er ist 21%. Haben sich nun G cbm Gas mit L cbm Luft gemischt zu $G + L$ cbm Gemisch — wobei nur G

bekannt, L aber zu berechnen ist —, so sind im Gas $\frac{o_1}{100} \cdot G$ cbm, im Gemisch $\frac{o_2}{100} \cdot (G + L)$ cbm, in der Luft $\frac{21}{100} \cdot L$ cbm Sauerstoff, und nun muß sein

$$\frac{o_1}{100} \cdot G + \frac{21}{100} \cdot L = \frac{o_2}{100} \cdot (G + L),$$

$$(21 - o_2) \cdot L = (o_2 - o_1) \cdot G,$$

$$L = \frac{o_2 - o_1}{21 - o_2} \cdot G \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Damit ist die Messung der Luftmenge auf die Messung der (kleineren) Gasmenge und auf die Ermittlung des prozentualen Sauerstoffgehaltes an zwei Stellen zurückgeführt. Letztere Ermittlung ist mit Hilfe des Orsat-Apparates zu bewirken (S. 367). Wenn übrigens, wie oft, kein Sauerstoff im Gas ist, so vereinfacht sich das Verfahren noch.

Auf dem gleichen Grundgedanken beruht die Ermittelung der Abgasmenge eines Verbrennungsvorganges (S. 376), bei der man weiß, daß das durch den Prozeß hindurchgehende Kohlenstoffgewicht vor und nach der Verbrennung dasselbe ist.

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der Mischungsregel bietet die Bestimmung des *freiwilligen Luftwechsels eines Raumes*. Jeder Raum, namentlich wenn er beheizt ist, tauscht durch Poren der Wände und Zwischendecken, durch Ritzen von Türen und Fenstern Luft mit der Umgebung aus, deren Messung gelegentlich erwünscht sein kann, auf direktem Wege aber fast unmöglich ist. Man hat die Messung so bewerkstelligt, daß man der Raumluft ein Gas beimischt, das indifferent ist, gesundheitlich sowohl als auch was Absorption durch die Wände anlangt, und dessen Beimenge leicht und sicher festzustellen ist. Man beobachtet die zeitliche Abnahme des Gehaltes an diesem Bestandteil; eine einfache Integration ergibt den Luftwechsel, der die Abnahme veranlaßt. Verwendet man Kohlensäure CO_2 als indifferentes Gas, so hat man zu beachten, daß die nachrückende Luft schon $0{,}4‰$ CO_2 enthält und hat Einführung von Atemluft (4% CO_2) in den Raum zu vermeiden. Die Feststellung des prozentualen Kohlensäuregehaltes ist durch Absorption mit Barytwasser und Titrieren mit Oxalsäure sehr genau zu machen. (Methode von Pettenkofer, siehe Wolpert, Ventilation und Heizung, Band III.)

In ähnlicher Weise kann man die *Messung großer Wassermengen bei Turbinenanlagen* dadurch vornehmen, daß man oberhalb der Turbine eine bestimmte Menge einer Salzlösung zusetzt und hinter der als Mischer wirkenden Turbine den Prozentgehalt chemisch bestimmt. Diese in der vorigen Auflage dieses Buches angeregte Meßmethode ist inzwischen mit Erfolg verwendet worden. Die zugefügte Lösung war eine konzentrierte Kochsalzlösung, der Gehalt im Wasser wurde mit Silbernitrat bestimmt. Von anderer Seite wird auch ein Zusatz von Natriumhyposulfit und Titrieren mit Jodlösung als bewährt emp-

fohlen [1]). Die Genauigkeit der Messung hängt namentlich von dem Grade der Durchmischung in der Flüssigkeit ab, die am besten bei Peltonrädern erreicht werden soll [2]). Die verfügbare Wassermenge für ein geplantes Kraftwerk zu messen wird nur dann in gleicher Weise möglich sein, wenn es sich um genügend unruhiges Wasser handelt, und wenn man die Entnahmestelle genügend entfernt von der Zusatzstelle wählen kann.

a) Versuchsanordnungen zur Mengenbestimmung.

50. Wägen. Zu Gewichtsbestimmungen dient die Wage. Mit ihrer Hilfe sind Mengenbestimmungen selbst bei mäßiger Sorgfalt noch mit einem Grade von Genauigkeit auszuführen, der die Bedürfnisse von Maschinenuntersuchungen bei weitem übertrifft. Da ferner die Gewichtsmessung von der Temperatur unabhängig ist, die Volumenmessung aber ihre Beachtung verlangt, was nicht immer leicht zu machen ist — so können wir geradezu die Regel aussprechen, man solle wägen, wo immer es tunlich ist.

Jeder Körper wird von der Erde verschieden stark angezogen, sein Gewicht ist also bei übrigens gleichen Umständen verschieden, je nachdem er sich im lufterfüllten oder im luftleeren Raum befindet. Im lufterfüllten ist er nach dem Gesetz vom *Auftrieb* um so viel leichter, wie das verdrängte Luftvolumen wiegt. Die Stoffmenge ist nun offenbar durch das Gewicht im luftleeren Raume gegeben, denn sonst wäre die Angabe von dem momentanen Barometerstand und von der Temperatur abhängig. Und in der Tat sind alle Angaben über spezifische Wärmen, spezifische Gewichte und dergleichen so zu verstehen, daß sie sich auf ein Kilogramm im luftleeren Raum beziehen. Insbesondere bei Gasen ist eine andere Angabe ja geradezu widersinnig.

Der Fehler, den man durch Nichtbeachten dieser Verhältnisse macht, ist um so größer, je geringer das spezifische Gewicht des betreffenden Körpers ist, je mehr Luft er also verdrängt. Ein Kubikmeter Wasser wiegt 1000 kg, die von ihm verdrängte Luft 1,3 kg bei 0°, oder nur 1,2 kg bei 20°. Man begeht nur Fehler von 0,13 oder 0,12%, wenn man nicht auf den luftleeren Raum reduziert.

Dieser Fehler wird bei Gewichtswagen noch vermindert dadurch, daß auch die benutzten Gewichte einen Auftrieb erfahren; er beschränkt sich auf den Unterschied der Volumina von gewogenem Körper und Gewichten. Der Fehler, der durch Vernachlässigung des Auftriebes der Luft bei Wägungen entsteht, ist daher technisch meist belanglos. —

Von den zahlreichen Formen der Wage kommt für unsere Zwecke namentlich die *Brückenwage* in Betracht. Für die seltenen Fälle, wo man eine feinere Balkenwage verwendet — um etwa bei Heizwertbestimmungen, Kap. XIII, die Kohlebriketts zu wägen —, kann man sich erforderlichenfalls in Physikwerken Rat holen. Die Federwage dient uns nur als Dynamometer (S. 204). Für Mengenbestimmungen ist sie wenig genau.

[1]) Iterson, Z. d. V. D. I. 1914, S. 280. Vgl. die näheren sachlichen Angaben im Literaturverzeichnis, S. 396.

[2]) Schweiz. Bauzeitung, 26. Juli 1913; Z. f. d. ges. Turbinenwesen, 20. Dez. 1913.

Getriebe von Brückenwagen sind in Fig. 86 bis 88 schematisch dargestellt. Die Last steht auf der sogenannten Brücke *B*, die auf Hebeln ruht. Die Hebel werden zum Einspielen gebracht, d. h. in ihre Mittel-

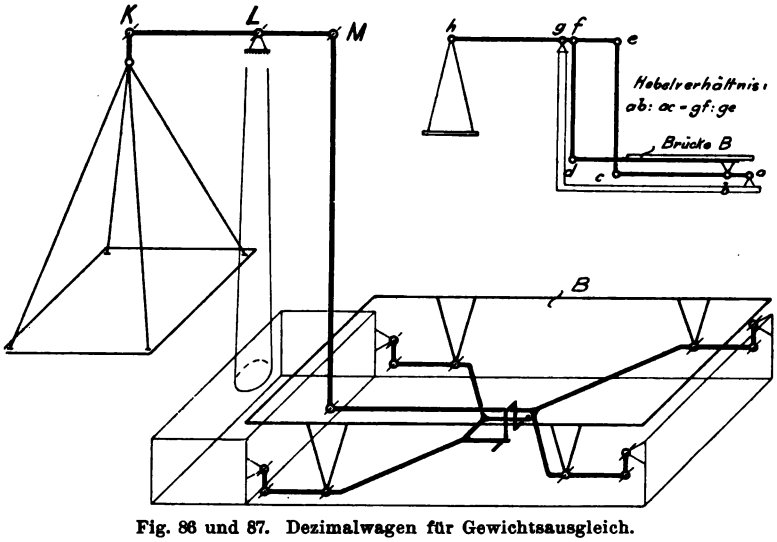


Fig. 86 und 87. Dezimalwagen für Gewichtsausgleich.

stellung zurückgezogen, entweder indem man Gewichte auf eine Gewichtsschale setzt, oder indem man ein Laufgewicht auf einem Hebel mit Skala verschiebt; beide Anordnungen sind gebräuchlich, die Messung durch Laufgewicht ist viel bequemer. Aus der Menge der aufgesetzten Gewichte, aus der Stellung des Laufgewichtes erkennt man die zu messende Last.

Die Hebelanordnung muß so sein, daß beim Hin- und Herspielen der Hebel die Brücke stets sich selbst parallel bleibt, so daß die Last sich um gleich viel hebt und senkt, sie stehe an welcher Stelle der Brücke sie wolle. Dann folgt aus dem Gesetz der virtuellen Verschiebungen, daß es beim Wägen gleichgültig für das Ergebnis ist, wo auf der Brücke die Last steht — und das muß natürlich gleichgültig sein. Die in den Figuren gegebenen Anordnungen erfüllen diese Bedingung; Fig. 86 nur, wenn die dazugesetzten Hebelverhältnisse innegehalten werden. Außer der Forderung der Parallelführung hat der Konstrukteur einer Wage eine

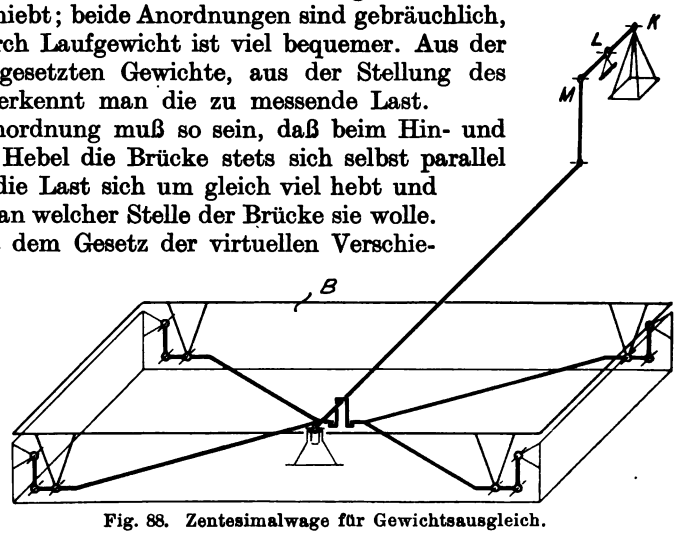


Fig. 88. Zentesimalwage für Gewichtsausgleich.

Reihe von Bedingungen zu erfüllen, die für das richtige Arbeiten der Wage maßgebend sind. Last und Gewichte sollen sich nämlich im stabilen Gleichgewicht miteinander befinden, so daß die Wage, durch Anstoßen aus ihrer Mittellage gebracht, stets wieder von selbst in dieselbe zurückkehrt; die Empfindlichkeit der Wage soll möglichst groß sein; und das alles soll nicht nur bei einer, sondern bei jeder Last der Fall sein. Man erreicht es durch die bekannte Bedingung, daß bei den Hebeln die drei Schneiden in einer Geraden liegen müssen, ferner durch Geringhalten der beweglichen Massen von Hebel und Brücke, die man wohl als tote Last bezeichnet, endlich durch passende Verteilung dieser Massen. Die als Achsen gezeichneten Lagerungen sind sämtlich Schneidenlager.

Bessere Brückenwagen haben eine *Entlastung*. Hebt man den Wägearm KL, so daß M sich senkt, so senkt sich auch die Brücke und kann sich auf zu dem Zwecke vorhandene Auflager stützen. Alle Schneiden werden dadurch entlastet. Man soll nur in entlastetem Zustand der Wage Lasten auf die Brücke bringen, um die Schneiden zu schonen. Ein nur einmaliger Verstoß hiergegen mindert die Empfindlichkeit einer Wage sehr.

Um die Wage dann in Wiegezustand zu bringen, ist offenbar ein Anheben der ganzen Last erforderlich, wenn auch nur um wenige Millimeter. Bei großen Lasten bedingt das eine von Hand oder mechanisch betätigte Windevorrichtung, bei deren Entwurf zu beachten ist, daß dieselbe zum Heben der Last eine bestimmte, gegebene Arbeit zu leisten und zu übertragen hat. Solche und manche andere mechanische Einrichtung, beispielsweise selbsttätige Registriervorrichtungen für alle über eine Wage gegangenen Lasten, machen moderne Wagen zu komplizierten Apparaten, für welche die übliche Bezeichnung „Wägemaschine" wohl zutrifft.

Zur Frage nach der genaueren *Form einer zu beschaffenden Wage* läßt sich sagen, daß *Laufgewichtswagen* entschieden den *Gewichtswagen* vorzuziehen sind, der viel bequemeren Handhabung wegen. Wegen der schwierigeren Herstellung und Justierung der Balkeneinteilung sind sie rd. 25% teurer als jene — der Minderpreis geht aber leicht auf Beschaffung der Gewichte.

Der Ständer mit dem Balken für das Laufgewicht tritt bei der Laufgewichtswage an die Stelle der Gewichtsschale der Fig. 86 bis 88. Übliche Formen der Laufgewichtsbalken zeigen Fig. 89 und 90, die auch die übliche Konstruktion aller Gelenke aus Pfanne und Schneide erkennen lassen. Ein durch Schraube gehaltenes Sperrstück verhütet, daß beim Transport die Schneide aus der Pfanne fällt.

Bei Fig. 89 ist nur ein Hauptlaufgewicht vorhanden, in dem stabförmige Nebenskalen verschiebbar sind, die die Unterteile der Hauptteilung angeben; die gesamte Laufgewichtsanordnung ist also in sich geschlossen; sie kann auch mit Einrichtung zum Kartendrucken versehen werden, wie in Fig. 89. Die unteren Flächen des Balkens und der Nebenskalen liegen alle in einer Ebene; an passender Stelle sind auf ihnen die erforderlichen Zahlen eingraviert; gegen sie kann mittels Druckhebels

und Exzentertriebes ein eingeschobenes Blatt aus weicher Pappe gedrückt werden, auf dem die Zahlen erhaben abgedruckt werden. Mannigfache Anordnungen sind erdacht und erprobt, um Fälschungen der Kartenblätter zu vermeiden, die oft als Abrechnungsbeleg zu dienen haben. So verhüten Sperrungen der Exzenterbewegung, daß man drucken kann,

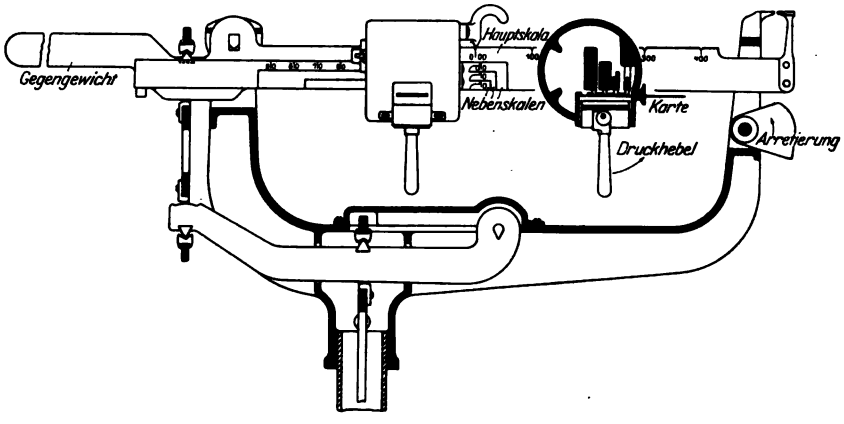


Fig. 89. Laufgewichtsanordnung mit Druckeinrichtung. Garvenswerke in Wülfel.

wenn nicht alle Skalen auf volle Zahlen eingestellt sind. Auch verhütet man, daß das Abdrucken anders als im Gleichgewichtszustande des Hebels erfolgen kann. Dazu wird das ganze Hebelwerk in einen Kasten eingeschlossen; die Laufgewichte werden von außen durch Triebe betätigt. Erst wenn die Wage einspielt, kann man eine Paßstange in eine Kerbe einlegen und damit die Druckbewegung freigeben. Damit aber weder durch die Zahntriebe noch durch die Karteneinführung fälschlich Momente auf den Balken ausgeübt werden können, sind alle diese Teile in die Berührungsachse der Schneiden und Pfannen des Laufgewichtsbalkens gelegt.

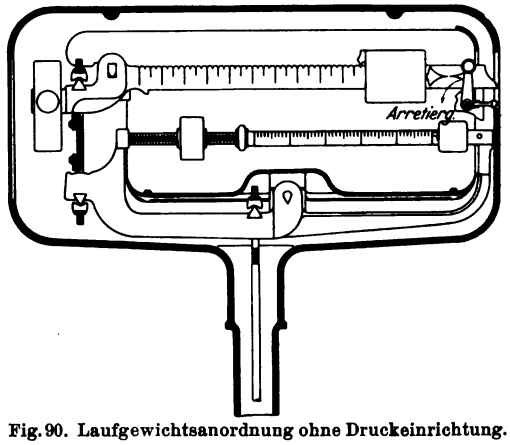


Fig. 90. Laufgewichtsanordnung ohne Druckeinrichtung.

Wo man auf das Drucken keinen Wert legt, sollte man die viel bequemer zu handhabende Anordnung Fig. 90 wählen, bei der die Nebenskala auf einem besonderen Balken unterhalb des Hauptbalkens angebracht ist. — Bei Dezimalwagen sollte man darauf achten, daß sie wenigstens ein *Hilfslaufgewicht* haben, das ist ein kleines, neben

dem Balken laufendes Gewicht, das meist bis zu 5 kg mißt und das lästige Aufsetzen der kleineren Gewichte auf die Gewichtsschale umgehen läßt.

Da die Wagen vielfach dem öffentlichen Verkehr dienen, so wird ihre Herstellung und Instandhaltung vom Staate insofern überwacht, als Wagen nur nach amtlicher *Eichung* öffentlich benutzt werden dürfen. Daher sind die käuflichen Wagen im allgemeinen verläßlich, auch wenn das einzelne Exemplar nicht geeicht ist. Geeichte Wagen haben den Stempel eines Eichamts, der für Brückenwagen erteilt wird, sobald ihr Fehler bei Höchstlast nicht größer als 0,6 g auf jedes Kilogramm Last ist; bei $^1/_{10}$ der Höchstlast darf die Wage einen Fehler gleich dem fünften Teil des bei Höchstlast zulässigen Fehlers haben, der Fehler darf dann also 1,2 g pro Kilogramm Last ausmachen.

Eine Brückenwage, gleichgültig ob Dezimal-, Zentesimal- oder Laufgewichtswage, etwa von 1000 kg Wiegefähigkeit, wird geeicht, indem man zunächst die Zungen leer zum Einspielen bringt. Man bringt 100 kg, dann 1000 kg auf die Brücke, entlastet wieder auf 100 kg, um zu sehen, ob die Wage sich bei der Höchstlast nicht verändert hat, und entlastet wieder ganz. Ihr Fehler darf 600 g bei Höchstlast und $\frac{1}{5} \cdot 600 = 120$ g bei kleiner Last sein. Bei jeder der Belastungen von 100, 1000 und wieder 100 kg hat man die Genauigkeit und die Empfindlichkeit der Wage zu prüfen: beide müssen sich innerhalb der genannten Fehlergrenze halten. Sollte also eine Dezimalwage nicht ganz einspielen, wenn man der Höchstlast von 1000 kg 100 kg Gewichte auf der Gewichtsschale entgegensetzt, so muß man sie doch zum Einspielen bringen können, indem man höchstens 600 g von der Brücke wegnimmt oder hinzufügt: dann ist die Genauigkeit ausreichend. Und hat man die Wage bei der Höchstlast zum genauen Einspielen gebracht, so muß sie durch Aufsetzen von 600 g auf die Brücke nicht nur aus der Gleichgewichtslage kommen, sondern auch in einer von der Mittelstellung „deutlich" abweichenden Stellung zur Ruhe kommen: dann ist die Empfindlichkeit ausreichend. Will man eine Wage eichen, ohne so viel Gewichte zu haben, wie die Höchstlast beträgt, so muß man mit einer kleinen, natürlich zuverlässigen Hilfswage Eisenteile oder dergleichen in kleinen Portionen zuwiegen.

Wageneichungen werden von den Königlichen Eichämtern (in Preußen) nach diesen Vorschriften und für andere Wagenformen nach anderen, in der Eichordnung für das Deutsche Reich vom Jahre 1908 enthaltenen Bestimmungen geeicht. Die neue Eichordnung von 1908 schreibt eine Erneuerung der Eichung in jedem zweiten Jahre vor. Die Gebühren sind so mäßig, daß man meist besser daran tun wird, sie amtlich eichen zu lassen, als dies selbst zu besorgen.

Die Eichung der Gewichte ist so wichtig wie die der Wage; durch Schmutz, Rost und Abspringen von Ecken können Gewichte falsch werden. Wir verweisen auf die anderen Orts gemachte Bemerkung, daß gerade bei den einfachsten Messungen, nämlich Längen- und Gewichtsmessungen, am meisten gesündigt wird durch prüfungslose Verwendung schlechter Meßwerkzeuge.

51. Messen und Wägen von Flüssigkeiten. Flüssigkeiten und körnige Stoffe kann man nur unter Benutzung eines auf der Wage stehenden Behälters wiegen. Man nennt das Gewicht des Behälters die *Tara*, das Gewicht von Flüssigkeit einschließlich Behälter heißt *Brutto-* und das Gewicht der Flüssigkeit allein *Nettogewicht*. Das Nettogewicht will man ermitteln und findet es als Differenz: Brutto minus Tara. Das Ausgleichen des Taragewichts heißt Austarieren.

Die Tara soll möglichst klein sein, sonst wird das Wägen zu einer Differenzmethode und die Messung ungenau (S. 29). Das Eigengewicht der Brücke bildet schon gewissermaßen einen Teil der Tara, und da es bei kleiner Belastung relativ mehr ausmacht als bei Höchstlast, so mißt die Wage ohnehin bei der Höchstlast am besten. In den Bestimmungen über Wageneichungen sahen wir dem Rechnung getragen.

Man soll also sowohl die Wage als auch den Behälter nicht größer nehmen als nötig.

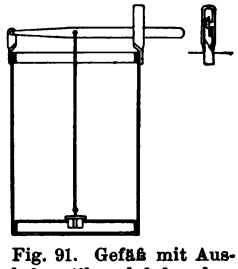


Fig. 91. Gefäß mit Auslaßventil und federndem Verschlußhebel zum Abwiegen von Flüssigkeiten.

Flüssigkeiten mißt man oft durch Einfüllen in *geeichte Gefäße*. Entweder hat das Gefäß eine Skala, an der man jede beliebige Flüssigkeitsmenge ablesen kann (Mensuren), oder es hat eine Marke (Eichstrich), bis zu dem hin es eine gewisse Menge Flüssigkeit enthält, die man durch Versuch feststellt und die keine runde Zahl zu sein braucht. Eine Skala am Gefäß gestattet selten befriedigende Messung, weil meist eine verhältnismäßig große Oberfläche vorhanden ist, so daß ein geringer Irrtum in der Ablesung großen Einfluß gewinnt. Bei Gefäßen mit einem Eichstrich — oder mit zwei Eichstrichen, zwischen denen ein bestimmtes Volumen liegen soll, kann man den Einfluß kleiner Niveauunterschiede bei der Messung mindern, indem man das Gefäß in der Gegend des Eichstrichs enger macht. Wo die Messung so geschieht, daß man das Gefäß zum Rande füllt, entsteht eine Unsicherheit durch die Ausbildung einer Kuppe (Meniskus), die verschieden hoch sein kann.

Ebenso wichtig wie die Möglichkeit genauen Auffüllens ist die Möglichkeit genauer Entleerung. Das Übliche hierzu ist, den Auslauf als Heber wirken zu lassen, so daß er plötzlich abreißt, wenn er Luft erhält, vergleiche Fig. 93. Bei dieser Anordnung hat man auch bis zum Augenblick des Abreißens noch eine endliche Ausflußhöhe, zum Schluß von der Höhe h_0, so daß man nicht lange auf das Austropfen zu warten hat. Zum Ausrichten des Gefäßes ist eine Fläche für die Wasserwage vorzusehen, oder besser sollte der Gefäßboden zum Hahn hin Gefälle haben, auch wohl eine Versenkung kleineren Querschnitts.

Die Messung ist unter allen Umständen abhängig von der *Temperatur*; da sowohl die Flüssigkeit als auch das Gefäß sich ausdehnt, so kann man den Einfluß der Temperatur nur durch Versuch finden. Die Eichung muß also bei einer Reihe von Temperaturen oder doch bei der Verwendungstemperatur stattfinden.

Die *Eichung* geschieht meist, indem man das Gefäß zur Marke auf-

füllt und die Wassermenge wägt. Will man nun eine Eichung nach Volumen vornehmen, so muß man, mindestens bei warmem Wasser, die Ausdehnung des Wassers durch die Wärme berücksichtigen. Man habe etwa ein Gefäß bei 60° C zu kalibrieren und findet durch Wägung, daß es 734 kg Wasser faßt; dann ist sein Inhalt nach Fig. 81, S. 101, $\frac{734}{0{,}983}$ = 746 l. Man kann das Gefäß also mit der Aufschrift versehen: „0,746 cbm bei 60°“ oder auch „734 kg Wasser bei 60°“; falsch aber wäre die Aufschrift „0,734 cbm“.

Die für große Gefäße zuverlässigste und bequemste Art der Eichung ist die Zufügung einer bekannten Menge einer leicht quantitativ bestimmbaren chemischen Substanz und Messung der Konzentration nach erfolgter gründlicher Durchmischung. Man kann dazu Natriumthiosulfat benutzen, das mit Jodlösung titrimetrisch bestimmt wird. Man kann auch Fluoreszein oder Eosin benutzen und kolorimetrisch bestimmen. Vgl. hierüber die sachlichen Angaben im Literaturverzeichnis auf S. 396.

52. Dauermessungen. Um durch Wägen eine dauernd fließende Menge zu messen, kann man sich zweier Gefäße von gleichem oder verschiedenem Inhalt bedienen, die auf Wagen stehen und in die man das Wasser abwechselnd leitet; das Ende der zuführenden Rohrleitung ist dazu beweglich drehbar eingerichtet, um abwechselnd beide Gefäße zu füllen. Unten an den Gefäßen ist ein Ventil oder Hahn angebracht, durch den man das Wasser nach erfolgter Wägung abläßt. Je schneller das Wasser abläuft, für desto größere Wassermengen reicht die Einrichtung aus, man mache also die Ausflußöffnung groß. Ist sie ungenügend, so schafft ein angesetztes Rohrstück, saugend wirkend, Besserung (ähnlich wie bei Fig. 93 besprochen). Ein Gefäß nach Fig. 91 ist zweckmäßig, der Verschlußhebel federt und sorgt daher für dichten Abschluß des Ventils.

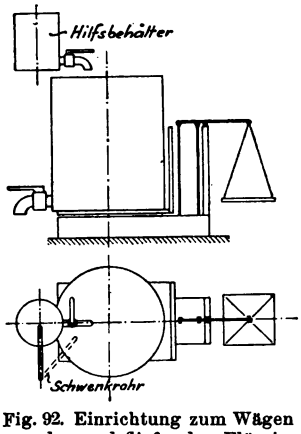


Fig. 92. Einrichtung zum Wägen von dauernd fließenden Flüssigkeiten.

Hat man ein großes und ein kleines Gefäß zur Verfügung und zwei entsprechende Wagen, so benützt man das große zum Messen, und das kleine fängt das Wasser nur in der Zeit auf, die man zum Wägen des großen und zum Auslassen des Inhaltes gebraucht. Man braucht auch nur das große Gefäß auf einer Wage zu haben, das kleine Hilfsgefäß steht höher und kann nach Bedarf ins Hauptgefäß entleert werden (Fig. 92). Während der Wägung des großen fängt man das Wasser im Hilfsgefäß auf; nach Entleerung des Hauptgefäßes läßt man den Inhalt des Hilfsgefäßes ins Hauptgefäß und verwiegt ihn mit dem nächsten Quantum. Die umgekehrte Einrichtung findet man für Kesselspeisung verwendet: von zwei Gefäßen steht das obere auf der Wage, man läßt die abgewogene Wassermenge in den unteren Vorratsbehälter, aus dem die Speisepumpe nach Bedarf entnehmen kann. Im Vorratsbehälter

muß das Wasser am Anfang und am Ende des ganzen Versuches gleich hoch stehen (Wasserstandsglas). Die Einrichtung Fig. 92 ist brauchbar, wenn das Wasser nach, die andere, wenn es vor der Benutzung gemessen wird.

Bei dauernd fließenden Flüssigkeiten kann man auch eine Volumenmessung mit Hilfe zweier Gefäße von gleichem oder verschiedenem Inhalt vornehmen; im Notfall braucht auch hier nur eines kalibriert zu sein. Da das Auffüllen bis an eine Marke nur unsicher zu machen ist, so ist ein geteiltes Gefäß nach Fig. 93 zweckmäßig: eine der beiden Hälften füllt sich bis an die niedrigere Scheidewand an, dann läuft der Überschuß in die andere leere Hälfte. Man schwenkt nun das Zuflußrohr herum und entleert die erste Hälfte durch den Hahn. Ist die zweite Hälfte voll, so läuft das Wasser von selbst in die erste. Jede der Hälften ist geeicht. Bei Benutzung solcher Gefäße ist es oft lästig, daß man nicht jede beliebige Menge messen kann, sondern nur Vielfache der Gefäßinhalte.

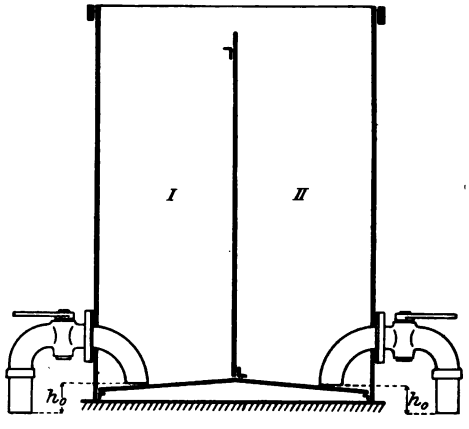


Fig. 93. Geeichtes Doppelgefäß mit Heberauslauf.

Hat man nur ein Gefäß zur Verfügung, so hilft man sich, indem man mittels Stechuhr die Zeit zum Auffüllen eines bestimmten Gewichtes Wassers feststellt.

Sehr empfehlenswert ist in vielen Fällen die Verwendung einer *Abreißspitze*, um genau zu erkennen, wann ein bestimmtes Volumen oder Gewicht Flüssigkeit verbraucht oder geliefert ist. Den Ölverbrauch von Dieselmaschinen z. B. bestimmt man am sichersten durch Abwiegen, und durch Einfüllen in ein oben offenes Gefäß, dessen Rohr nach Entfernung der normalen Ölleitung an die Brennstoffpumpe angeschraubt wird. Bestimmt wird die Zeit, während der 1 kg oder 5 kg verbraucht sind; das ist der Fall, wenn diese Menge in das Gefäß eingefüllt ist und wenn dann der Ölstand im Gefäß wieder der anfängliche ist. Um letzteres zu beobachten, kann ein Ölstand dienen. Genauer ist es, eine Drahtnadel von einem aufgelegten Flacheisen *a* in das Öl herabstehen zu lassen: als Anfang und als Ende der Versuchszeit gelten die Zeiten, wo der Ölspiegel von der Nadel abreißt; diese Zeitpunkte sind sehr genau zu beobachten. Es empfiehlt sich, das Blech mit der Nadel lose auf das Gefäß zu legen, nicht etwa festzumachen; durch Anheben

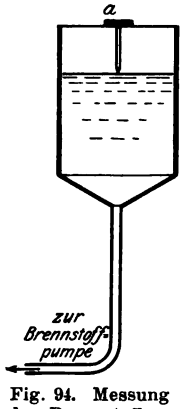


Fig. 94. Messung des Brennstoffverbrauchs eines Ölmotors.

kann man sich dann jederzeit überzeugen, wie lange es noch bis zum Abreißen dauern wird.

53. Volumetrische Ermittlung von Gasmengen. Die Gasmenge kann man entweder feststellen, indem man das Gas einem Behälter bei konstant bleibendem Druck entnimmt oder in ihn einfüllt und die Volumenänderung beobachtet; das tut man in Meßglocken. Oder man kann an einem Behälter konstanten Volumens die Druckänderungen beobachten.

Zur direkten Messung eines Gasvolumens dient die *Meßglocke*, eine unten offene, in Wasser tauchende Blechglocke (Fig. 95); das Gas tritt durch Rohr *a* ein, dabei hebt sich die Glocke, oder es tritt durch dasselbe Rohr *a* aus, dann sinkt die Glocke. Da die Glocke genau rund hergestellt ist, so kennt man das Volumen, welches jedem gemessenen Hube der Glocke entspricht. Man kann es auch experimentell feststellen. Die Höhe des Wasserstandes ist dabei gleichgültig. Die Stellung der Glocke kann man an einer, bei großen Glocken an drei Skalen, die über den Umfang verteilt sind, unter Zuhilfenahme einer Visiervorrichtung ablesen.

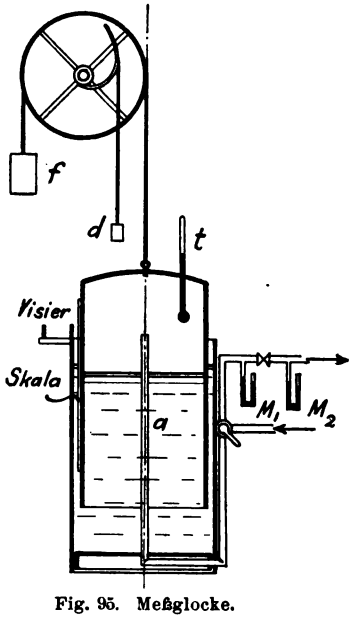


Fig. 95. Meßglocke.

Es ist noch erforderlich, die Spannung des Gases unter der Glocke zu messen. Der Unterschied dieser Gasspannung gegen die Atmosphäre, also der Überdruck des Gases, ist durch den Niveauunterschied des Wassers innerhalb und außerhalb der Glocke gegeben: er gleicht gerade das Eigengewicht der Glocke aus, soweit es nicht durch Ausgleichgewichte *f* ausgeglichen ist; man kann ihn am Wassermanometer M_1 erkennen und durch Auflegen von Gewichten bei *f* auf die gewünschte Höhe bringen. Dieser Überdruck des Gases soll bei allen Stellungen der Glocke der gleiche sein, weil sonst gleichen Glockenhüben nicht auch gleiche Gasmengen entsprechen und umständliche Reduktionen nötig werden. Bei sinkender Glocke wird das Stück der Glocke, welches in Wasser taucht und dem Auftrieb unterworfen ist, immer größer, das Eigengewicht der Glocke also immer kleiner, und damit würde die Gasspannung sinken. Das verhütet Gewicht *d*, das an veränderlichem Hebelarm angreift und die Änderungen des Glockengewichts ausgleicht.

Die Wassertemperatur muß mit der äußeren Lufttemperatur übereinstimmen, sonst wird man nie die Gastemperatur am Thermometer *t* sicher feststellen können. Bei großen Glocken ist diese Bedingung kaum zu erfüllen.

Bei kleinem Gasbedarf kann man das Gas direkt einer Glocke entnehmen und dadurch messen. So kann man eine Gasmaschine erst in

Beharrungszustand kommen lassen, ihr dann während einer verhältnismäßig kurzen Zeit Gas aus der Gasglocke zuführen und dadurch den Gasverbrauch bestimmen. Hat man zwei Glocken zur Verfügung, so kann man sie abwechselnd benutzen und die Versuche beliebig lange ausdehnen. — Meist aber dienen die Glocken nur dazu, Gasmesser zu eichen, deren Verwendung dann viel bequemer ist. Diese Eichstationen für Gasmesser werden unten erwähnt werden. —

Eine leidlich sichere Messung von Gasmengen kann man durch Auffüllen eines Behälters von bekanntem Inhalt und Beobachten der Spannungszunahme erzielen.

Diese *Auffüllmethode* ist namentlich zur Bestimmung der Luftlieferung von Kompressoren üblich. Die Anordnung ist in Fig. 96 dargestellt. Der Kompressor C komprimiert die Luft auf einen Druck p_1, mit dem sie im Betriebe an irgendeinen Verwendungsort geht. Jetzt aber geht sie in einen Behälter von bekanntem Volumen V, an dem man Spannung p und Temperatur t jederzeit ablesen kann. Ein Drosselventil d sorgt dafür, daß man den Kompressor gegen einen beliebigen konstanten Druck arbeiten lassen kann, während in V der Druck ansteigt; d muß dazu ständig nachgeregelt werden. Durch Ventil e läßt man vor Beginn und nach Beendigung des Versuches die Luft ins Freie blasen. Bei der Versuchsausführung schließt man zunächst Ventil e und stellt nun fest, wann das Manometer p durch einen, wann es durch einen zweiten beliebigen Teilstrich geht. Sonst ist im Behälter V schon anfangs, trotzdem e offen ist, ein beträchtlicher Überdruck, den das Manometer nicht anzeigt, weil diese Instrumente nahe dem Nullpunkt schlecht zeigen. Bessere Ergebnisse wird oft die Verwendung eines Quecksilbermanometers liefern.

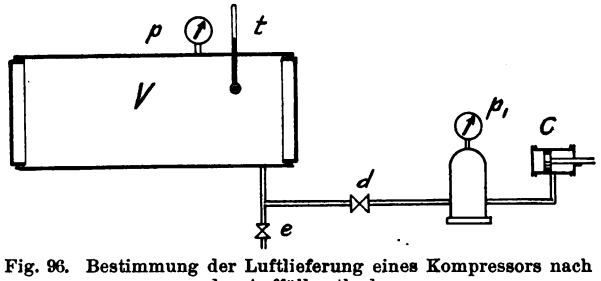


Fig. 96. Bestimmung der Luftlieferung eines Kompressors nach der Auffüllmethode.

Die Berechnung der eingefüllten Menge geschieht nun wie folgt: In einem Raum von V cbm Inhalt befindet sich beim Druck p kg/qm und bei der Temperatur $t°$ C oder absolut $T°$ ein Gewicht von $G = \frac{V \cdot p}{29{,}27 \cdot T}$ kg, wenn es sich um Luft handelt, für die $R = 29{,}27$ die sogenannte Gaskonstante ist; für ein anderes Gas von der Dichte δ, bezogen auf Luft = 1 (S. 108) wäre $G = \frac{\delta}{29{,}27} \cdot \frac{V \cdot p}{T}$. Bleiben wir aber bei Luft, so möge am Anfang eines Versuches der Druck p' und am Ende p'' kg/qm beobachtet sein; dann waren anfangs $\frac{V \cdot p'}{29{,}27 \cdot T}$ und

nachher $\frac{V \cdot p''}{29{,}27 \cdot T}$ kg Luft im Behälter, es ist also ein Luftgewicht

$$G = \frac{V}{29{,}27 \cdot T} \cdot (p'' - p') \text{ kg} \quad \ldots \ldots \quad (8)$$

in den Behälter eingefüllt worden. Das eingefüllte reduzierte Volumen wäre dann:

$$V_0 = \frac{G}{1{,}293} = \frac{V}{37{,}8\,T} \cdot (p'' - p') \text{ cbm} \left(\tfrac{0}{760}\right) \ldots \ldots \quad (9)$$

Die Auffüllmethode mißt also das Luftgewicht oder, was damit gleichbedeutend ist, das reduzierte Luftvolumen. Ihre Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres mit den Angaben der Gasuhr vergleichbar.

Darauf, daß der Druck in Formel (8) und (9) wegen der Anwendung der Gaskonstanten in kg/qm anzugeben ist, sei noch besonders hingewiesen.

Der wunde Punkt der Auffüllmethode ist die Temperaturmessung. Die Temperatur im Behälter wird nämlich nicht konstant bleiben: erstens kann die vom Kompressor kommende Luft eine andere Temperatur haben als die im Behälter befindliche, so daß wir nachher die Mischungstemperatur haben müßten; doch lassen sich solche Temperaturdifferenzen vermeiden, auch unschwer berücksichtigen durch Beobachten der Temperatur der ankommenden Luft. Zweitens aber wird ja die im Behälter vorhandene Luft durch die hinzukommende komprimiert und also Kompressionswärme erzeugt. Deren Betrag wäre wohl zu berechnen, aber der größte Teil der Wärme wird schon während des Versuches an die Behälterwand abgegeben — nur weiß man nicht, wieviel. Ein Thermometer t gibt schwerlich die mittlere Temperatur im Behälter an, folgt außerdem den Temperaturänderungen zu langsam, wenn seine Kugel nicht direkt von der Luft des Behälters umgeben ist, sondern in einem Stutzen steckt.

Genaue Messungen könnte man erzielen, wenn man dafür sorgte, daß man die Ablesung der Spannung am Ende des Versuches im Temperaturgleichgewicht vornehmen könnte. Ein Wechselhahn statt des Ventils d wäre nötig, um plötzlich den Behälter abzusperren und zugleich den Kompressor irgendwohin, etwa ins Freie, ausblasen zu lassen. Dann könnte man den Temperaturausgleich mit der Umgebung abwarten und nun Druck und Temperatur ablesen. Dichtheit des Behälters wäre eine — schwer zu erfüllende — Bedingung. Fände man übrigens zwischen Anfang und Ende des Versuches einen Temperaturunterschied, so wäre:

$$G = \frac{V}{29{,}27} \left(\frac{p''}{T''} - \frac{p'}{T'} \right) \ldots \ldots \ldots \quad (10)$$

das eingefüllte Luftgewicht.

In der Praxis begnügt man sich meist mit dem ungenaueren Verfahren. Jedenfalls aber sollte man dafür sorgen, daß die in den Behälter tretende Luft abgekühlt ist, dazu darf die Leitung vom Kompressor zum Behälter nicht zu kurz sein.

Die Auffüllmethode läßt sich umkehren und gibt dann einwandfreiere Resultate: man kann, um irgendeinen Luftverbrauch zu messen, die nötige Luft einem Behälter bekannten Inhalts V entnehmen, der vorher mit Druckluft gefüllt war und dessen Spannungsverminderung man beobachtet. Die Rechnung bleibt die gleiche. Die Temperaturmessung ist jetzt sehr viel sicherer auszuführen, denn man kann das Thermometer in das Entnahmerohr verlegen und bekommt so mit einiger Sicherheit die mittlere Temperatur im Behälter zu den verschiedenen Zeitpunkten.

Diese *Ausblasemethode* teilt mit der Auffüllmethode den Nachteil, daß man sie nicht für Dauerbetrieb verwenden kann.

Als *Beispiel* für die Anwendung der Auffüllmethode sei die Bestimmung der *Luftlieferung* und des *Lieferungsgrades eines Kompressors* vorgeführt. Zum Auffüllen wurde ein gerade unbenutzter Dampfkessel von 16,2 cbm Rauminhalt benutzt; zum Auffüllen vom Überdruck 400 mm QuS bis 900 mm QuS waren 206 sek nötig gewesen, die Temperatur im Kessel war zu 22° C = 295° absolut gemessen.

Nach Beendigung des Versuches wurde der Kesseldruck bis auf etwa 650 mm QuS Überdruck — das Mittel aus 400 und 900 — abgelassen und dann beobachtet, wie schnell der Kesseldruck infolge von Undichtheiten sank. In 10 min sank er von 652 auf 633 mm QuS, um 19 mm. Der Druckverlust durch Undichtheit ist also während der Versuchszeit von 206 sek mit $19 \times 206 : 600 = 6{,}5$ mm. An einem vollständig dichten Kessel gleichen Inhaltes wäre durch den Kompressor in 206 sek eine Drucksteigerung von $500 + 6{,}5 = 506$ mm gemessen worden; diese Berichtigung macht immerhin 1% aus.

Die 506 mm QuS Drucksteigerung waren an einer Quecksilbersäule von 20° gemessen; bei 0° hätte die gleiche Quecksilbersäule (Fig. 38, S. 56) nur 504 mm Länge gehabt; da bei 0° das spezifische Gewicht von Quecksilber 13,60 ist, so sind 504 mm QuS $= 504 \cdot 13{,}60 = 6850$ mm WS $= 6850$ kg/qm (S. 50). Das ist $p'' - p'$ der Formel (1); das in der ganzen Versuchszeit eingefüllte reduzierte Volumen wird $V_0 = \frac{16{,}2}{37{,}8 \cdot 295} \cdot 6850 = 9{,}94$ cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$; also förderte der Kompressor $9{,}94 : 206 = 0{,}0483$ cbm/sek $\left(\frac{0}{760}\right)$. — Nun hatte der Kompressor einen Zylinderdurchmesser von 250 mm und einen Hub von 300 mm; aus beiden berechnet sich das Hubvolumen zu 0,01473 cbm. Der Kompressor war doppeltwirkend und machte 125 Uml/min; also wurde durch den Kolben ein Raum von $\frac{2 \cdot 0{,}01473 \cdot 125}{60} = 0{,}0614$ cbm sekundlich freigelegt. Danach ist der *Lieferungsgrad* des Kompressors unter den gerade herrschenden Verhältnissen (nämlich bei 4,9 at Gegendruck, 741 mm BSt und 17° C Lufttemperatur), $\eta_l = \frac{0{,}0483}{0{,}0614} = 0{,}786$.

Der Lieferungsgrad, der also hiernach der Quotient aus dem tatsächlich angesaugten reduzierten Luftvolumen und dem vom Kolben

in der gleichen Zeit freigelegten Volumen ist, ist eine für die Beurteilung des Kompressors wichtige Größe, obwohl zu beachten ist, daß er nicht nur von den Eigenschaften des Kompressors, sondern auch von den äußeren Bedingungen abhängt, unter denen er arbeitet; er will gerade — im Gegensatz zu dem auf S. 129 zu besprechenden volumetrischen Wirkungsgrad, der fast nur vom Kompressor selbst abhängt — das Verhalten des Kompressors unter bestimmten Betriebsbedingungen zum Ausdruck bringen. Darüber, ob im Einzelfall der Lieferungsgrad oder der volumetrische Wirkungsgrad — ob das reduzierte oder das tatsächliche Fördervolumen maßgebend ist — ist schon in § 45 gesprochen worden.

54. Ermittlung von Dampfmengen durch Kondensatmessung. Dampfmengen mißt man meist nicht als solche, sondern man mißt das Wasser, aus dem der Dampf entstand oder das bei seiner Kondensation entsteht. Man mißt also, bei einer Dampfmaschine und einer Dampfheizung, entweder die in den Dampfkessel gespeiste oder die von der Kondensationspumpe oder dem Kondenstopf ausgeworfene Wassermenge.

Man kann das Wasser durch Wägen oder volumetrisch messen. Über die Anordnung im einzelnen sei nur bemerkt, daß man beim Wägen oder Ausmessen des wieder kondensierten Wassers dafür zu sorgen hat, daß das Wasser nicht so heiß ins Freie kommt, daß erhebliche Mengen durch Verdampfen oder Verdunsten verloren gehen. Wo das Wasser aus dem Mantel von Dampfmaschinenzylindern oder aus Hochdruckkochgefäßen zu messen ist, da kann das Kondensat über 100° Temperatur haben, und es würde notwendig beim Austritt in die Atmosphäre so viel verdampfen, bis der Rest durch Entziehung der Verdampfungswärme auf 100° gebracht ist; man kann die Verdampfung nur vermeiden, indem man das Kondensat vor dem Austritt abkühlt, es also durch Kühlschlangen gehen läßt; oder man müßte es volumetrisch messen, solange es noch unter Druck steht, wozu Meßgefäße nötig sind, die am Ein- und Auslaß mit Ventilen verschließbar sind und überdies einen in Liter geteilten Wasserstand haben. Wo dagegen das Kondensat unter 100° ist, sei es, weil es sich bei Vakuum niedergeschlagen hat, sei es, weil es sich schon auf dem Wege zum Austritt abgekühlt hat, da handelt es sich nur noch um Verdunsten, und das kann man leicht beseitigen oder einschränken, indem man das Meßgefäß mit einem lose passenden Deckel schließt; das Verdunsten hört dann auf, sobald die Luft über dem Wasser gesättigt ist, denn eine Drucksteigerung zum Austreiben des Dampfes ist, im Gegensatz zum Verdampfen, beim Verdunsten nicht möglich.

Wo man Dampfmengen in dieser Weise mißt, da wird mitgerissenes Wasser ebenso wie Dampf verwogen, man ermittelt also das Gewicht des feuchten Dampfes. Gegenüber Meßmethoden, die auf das Dampfvolumen ansprechen (Dampfdiagramm, § 55; Dampfmesser, § 72) und daher das Wasser wegen seines praktisch verschwindenden Volumens unbeachtet lassen, werden sich daher Unterschiede ergeben. Zu einem Vergleich hätte man die Dampffeuchtigkeit zu messen (§ 108). — Praktisch ist fast immer die eigentliche Dampfmenge maßgebend,

die ein Maßstab für die mitgeführte Wärmemenge ist; wegen der Schwierigkeit, sie zu messen, wird aber für die Dampferzeugung eines Kessels sowohl wie für den Dampfverbrauch von Maschinen das Gesamtgewicht von Dampf und Feuchtigkeit angegeben — woran man sich denn, um Vergleiche mit entsprechenden anderen Angaben zu ermöglichen, zu halten hat.

55. Mengenermittlung aus dem Indikatordiagramm. Die Diagramme von Kolbenmaschinen lassen eine Messung der in ihnen arbeitenden Stoffmenge zu, die zwar keine allgemein brauchbaren Ergebnisse liefert, aber für besondere Zwecke von Wert ist.

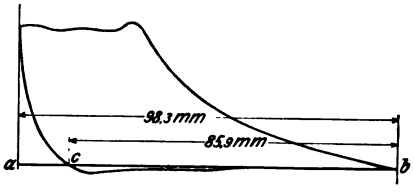


Fig. 97. Kompressordiagramm.

In dem Diagramm eines Kompressors, Fig. 97, stellt die Atmosphärenlinie $a\,b$ den Druck dar, von dem aus das Ansaugen stattfindet. Nun stellt die Strecke $a\,b$ das gesamte Hubvolumen des Kompressors dar, das 0,01473 cbm sei, wie auf S. 127. Von a bis c findet kein Ansaugen statt, erst nach Unterschreiten des Saugraumdruckes öffnet sich das Saugventil, und $c\,b$ ist der nutzbare Saughub. Das Verhältnis $c\,b : a\,b$ nennt man den *volumetrischen Wirkungsgrad* des Kompressors, den man zu $\frac{85{,}9}{98{,}3} = 0{,}874$ aus dem Diagramm ermittelt; dann wäre $0{,}874 \cdot 0{,}01473 = 0{,}01287$ cbm das bei einem Hub angesaugte Volumen.

Der so ermittelte volumetrische Wirkungsgrad — der nicht mit dem auf S. 127 ermittelten Lieferungsgrad zu verwechseln ist — ist eine für die Beurteilung der Maschine wichtige Größe; immerhin ist zu bedenken, daß eine Verminderung der Strecke $a\,c$ auch von Undichtigkeit des Druckventils herrühren kann, also nicht unbedingt eine Verbesserung bedeutet. Was die Messung der Luftmenge anlangt, so ist mit jener Feststellung, wonach 0,01287 cbm von Atmosphärenspannung angesaugt sind, wenig geholfen, da man die Temperatur nicht kennt, bei der das Volumen indiziert worden war.

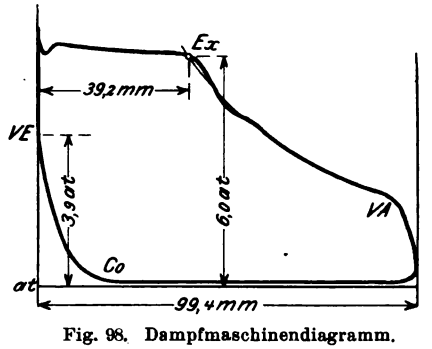


Fig. 98. Dampfmaschinendiagramm.

Meist ist der Zylinder so warm, trotz energischer Wasserkühlung, daß auch die Luft schon während des Ansaugens sich erwärmt. Man kann also die Bestimmung der Menge aus dem Kompressordiagramm nur als einen Notbehelf ansehen; die Temperaturen muß man schätzen.

Zuverlässiger wird die Bestimmung der Menge aus dem Diagramm überall da, wo es sich um gesättigten Dampf oder wo es sich um Flüssig-

keit handelt. Bei *Sattdampf* besteht ein fester Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur, so daß also die ebenerwähnte Unsicherheit über die Temperatur fortfällt. So sei das Diagramm Fig. 98 an einer *Dampfmaschine* aufgenommen, und wir messen daran, wie eingetragen ist, aus, daß die Füllung $\varphi = \frac{39{,}2}{99{,}4} = 0{,}394 = 39{,}4\%$ des Hubes beträgt und mit einem Druck von 6,0 at Überdruck endet. Der Kompressionsenddruck hat 3,9 at betragen. Von der Maschine sei das Hubvolumen 16,1 ltr der Werkzeichnung entnommen, der schädliche Raum, den der Kolben in der Totstellung noch freiläßt, sei auf 7% desselben geschätzt oder auch durch Auffüllen mit Öl zu 1,13 ltr gemessen. Dann wird ein Teil Dampf verwendet, um den schädlichen Raum von 4,9 at abs. auf den Admissionsdruck zu bringen, ein weiterer Teil dient dazu, bei konstantem oder wenig abfallendem Admissionsdruck den vom Kolben freigegebenen Raum zu füllen. Es ist gleichgültig, was diese beiden Teile ausmachen, im ganzen können wir sagen: Zur Zeit des Öffnens waren 1,13 ltr Raum mit Dampf von $\sim$ 4,9 at abs. entsprechend $\gamma = 2{,}57$ kg/cbm (nach den Dampftabellen) angefüllt, es waren also anfangs $0{,}00113 \cdot 2{,}57 = 0{,}00290$ kg Dampf vorhanden. Zur Zeit des Abschlusses waren $0{,}394 \cdot 16{,}1 + 1{,}13 = 7{,}47$ ltr mit Dampf von $\sim$ 7,0 at abs., entsprechend $\gamma = 3{,}59$ kg/cbm gefüllt, es waren dann $0{,}00747 \cdot 3{,}59 = 0{,}0268$ kg Dampf vorhanden. Der Unterschied $0{,}0268 - 0{,}00290 = 0{,}0239$ kg war bei dem Hube eingefüllt worden. Die andere Zylinderseite hat bei einer entsprechenden Auswertung des etwas abweichenden Diagrammes 0,0255 kg ergeben; die bei einem Umlauf eingefüllte Dampfmenge ist dann 0,0494 kg, und bei 70 Uml/min ergibt sich ein Dampfverbrauch von $0{,}0494 \cdot 70 \cdot 60 = 208$ kg/st.

Zu dieser Berechnung ist zu bemerken, daß sie nur den Dampf mißt, der noch am Schluß der Füllungsperiode als Dampf vorhanden ist; Feuchtigkeit mit ihrem geringen Volumen wird nicht gemessen. Insofern stimmen die Ergebnisse mit dem einer Kondensatwägung nicht überein. Insbesondere schlägt sich während der Füllungsperiode Wasser an der Wandung nieder, und insofern wird auch nicht aller in Dampfform eintretende Dampf berücksichtigt. — Bei überhitztem Dampf bestehen wegen Unkenntnis der Temperaturen ähnliche Unsicherheiten wie bei Kompressoren.

Wo man eine andere Meßmethode — Gasuhr, Auffüllmethode, Kondensatwägung — zur Verfügung hat, wird man sie vorziehen. Bei großen Kompressoren aber beispielsweise machen alle anderen Methoden Schwierigkeiten.

56. Mengenermittlung aus der mittleren Geschwindigkeit. Bei sehr großen Kanal- oder Durchflußquerschnitten kann man die Messung des durchgehenden Volumens auf eine Messung der Durchflußgeschwindigkeit in dem betreffenden Querschnitt zurückführen. Man stellt mittels der in § 40 bis 42 beschriebenen Methoden die mittlere Geschwindigkeit w_m fest. Diese, multipliziert mit der Größe F des Querschnitts, ergibt das sekundliche Volumen: $V = F \cdot w_m$. Als Nebenarbeit hat man also das Ausmessen des Kanalprofils an der fraglichen Stelle vorzunehmen.

Diese Art der Messung kommt namentlich für die *Wassermenge in Flußläufen und Turbinenkanälen* in Frage: Das Profil wird durch Ausloten aufgenommen, die Geschwindigkeit meist mittels des Woltmannschen Flügels gemessen.

Die Ermittlung der mittleren Wassergeschwindigkeit kann im wesentlichen auf zwei Weisen geschehen: Entweder man teilt das Querprofil (Fig. 99) in eine Reihe von Rechtecken und führt je eine Flügelmessung im Mittelpunkt jedes Rechteckes aus. Die an den Kanten verbleibenden Zwickel schlägt man zu einem der benachbarten Rechtecke. Oder man teilt das Querprofil (Fig. 100) in eine Reihe von senkrechten Streifen und bestimmt gleich die mittlere Wassergeschwindigkeit des ganzen Streifens, indem man den Woltmannschen Flügel an einer senkrecht stehenden Stange durch die ganze Tiefe des Streifens langsam und gleichmäßig ab und auf bewegt; hierzu gibt es besondere Kurbelvorrichtungen; zum Schluß liest man den Flügel ab. Flügel mit elektrischen Kontakten eignen sich zu dieser Art der Bestimmung schlechter, weil der Kontakt nicht gerade geschlossen wird, wenn man wieder

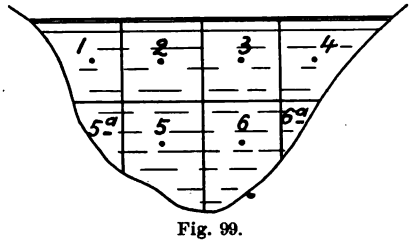


Fig. 99.

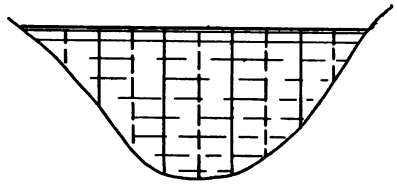


Fig. 100.

an der Oberfläche des Wassers anlangt. Einigermaßen korrekt ist die Bestimmung nach der zweiten Methode nur, wenn die Wassergeschwindigkeit groß ist gegenüber der Anlaufgeschwindigkeit des Flügels, weil nur dann die lineare Flügelgleichung brauchbar ist.

Die Verwertung der Meßergebnisse ist einfach.

Bei den regelmäßigen Hochwassermessungen in den großen Strömen ist der stets wechselnden Verhältnisse wegen schnellstes Arbeiten nötig, und so sind großartige maschinelle und feinmechanische Einrichtungen an den Flügelapparaten vorgesehen, um die meisten Arbeiten und Ablesungen mechanisch oder registrierend zu bewerkstelligen. Die Beschreibung solcher Einrichtungen würde hier zu weit führen[1]).

Ein anderes Anwendungsgebiet dieser Meßmethode ist die Messung der großen *Luftmengen* in den Kanälen von *Lüftungs-* oder *Kühlanlagen*. Der Querschnitt wird regelmäßig zerlegt und für jeden Ausschnitt die Luftgeschwindigkeit mit Anemometer oder Staurohr (§ 41 u. 42) festgestellt. Daraus läßt sich die Luftmenge berechnen. Man soll durch seinen Körper und durch die Meßeinrichtung die Luftbewegung möglichst wenig stören. Man kann die mittlere Geschwindigkeit auch bestimmen, indem man das Anemometer in dem Querschnitt hin und

[1]) Vgl. z. B. die Kataloge von A. Ott, Kempten, Bayern.

her bewegt, während es läuft, etwas planmäßig, so daß alle Teile des Querschnittes einigermaßen gleichmäßig zur Geltung kommen.

Wenn man solche Messungen in dem Ein- oder Ausblasrohr eines Zentrifugalventilators oder überhaupt in Luftwegen vornimmt, deren Abmessungen nicht gegenüber denen des messenden Anemometers als sehr groß anzusehen sind, da hat man zwei Fehlerquellen zu beachten. Zunächst ist der Luftdurchgang nach Einführung des Instrumentes nicht mehr derselbe, der er vorher war, weil das Instrument einen gewissen Widerstand darstellt; das hat zur Folge, daß man die Anlage nicht mehr unter den Verhältnissen des praktischen Betriebes untersucht, sondern unter veränderten; ob die Veränderung wesentlich ist, wird von Fall zu Fall zu erwägen sein. Außerdem wird auch die nach Einführung des Instrumentes wirklich durchlaufende Luftmenge insofern nur mit einiger Unsicherheit gemessen, als die auf S. 91 erläuterten Verhältnisse eintreten und die Geschwindigkeit im Instrument kleiner ist als in der übrigen Rohrleitung. Die erstgenannte Fehlerquelle bewirkt eine Verminderung der Luftmenge gegenüber dem praktischen Betriebe, die zweite bewirkt — je nach der Art der Eichung freilich, S. 93 — eine zu geringe Angabe des Instrumentes; beide wirken also unter Umständen in gleichem Sinne. — Übrigens wäre noch darauf aufmerksam zu machen, daß man die Luftgeschwindigkeit im Saugrohr eines Ventilators besser mißt als im Druckrohr, weil in letzterem die Luftbewegung stärker mit Wirbeln durchsetzt ist (S. 100).

Die Geschwindigkeit in der Mitte des Rohres oder Kanales ist wesentlich größer als die mittlere Geschwindigkeit. Die Reibung an der Kanalwand bewirkt, daß in der Nähe der Wand geringere Geschwindigkeiten vorhanden sind als in der Kanalmitte. Mit wechselnder Rauhheit und wechselnder Kanalabmessung, auch je nach dem Vorhandensein von Krümmungen im Kanalzug, ändert sich das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit zur Geschwindigkeit in der Mitte. Es ist also nicht möglich, aus einer Messung in der Kanalmitte die Durchflußmenge zu finden. Jedoch kann man einen fest in den Kanalzug eingebauten Geschwindigkeitsmesser, am besten einen statischen, empirisch so eichen, daß man nach erfolgter Eichung einigermaßen sicher die Menge finden kann.

In *kreisrunden Rohrleitungen* größeren Durchmessers mißt man die Luft oder Wassergeschwindigkeit mittels Anemometer oder Staurohr, das man über einen oder besser über zwei oder drei Durchmesser hin verschiebt, um aus dem Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung die mittlere Geschwindigkeit w_m zu ermitteln. Es ist dann das zu messende Volumen $V = F \cdot w_m$, hierin $w_m = \frac{1}{F} \cdot \int w\, dF = \frac{1}{r^2} \cdot \int w \cdot d\,(r^2)$ $= \frac{1}{\frac{1}{2} r^2} \int (w\, r)\, d\, r$. Man kann also, um die mittlere Geschwindigkeit zu finden, entweder $w = f\,(r^2)$ auftragen, die Ausgleichlinie durch Planimetrieren ermitteln, die unmittelbar die mittlere Geschwindigkeit auf die Fläche bezogen angibt — oder man kann $wr = f\,(r)$ auftragen, die Ausgleichlinie der Flächen gibt den Wert $\frac{1}{r} \int (wr)\, dr$, der mit $\frac{r}{2}$ zu divi-

dieren ist, um die mittlere Geschwindigkeit zu erhalten. — So waren in einem Rohr von 1,0 m lichter Weite folgende Messungen gemacht: An den Stellen einer beliebig angebrachten Skala

	$s = 0$	0,05	0,19	0,42	0,63	0,77	0,91	m
entsprechend	$r = 0{,}47$	0,42	0,28	0,05	−0,16	−0,30	−0,44	m
wurde gemessen	$w = 2{,}6$	2,9	3,2	3,5	3,4	3,3	3,0	m/sek
Es ist also	$wr = 1{,}22$	1,22	0,895	0,175	0,54	0,99	1,32	
und	$r^2 = 0{,}221$	0,176	0,0784	0,0026	0,0256	0,0900	0,1936	

Hieraus ergeben sich die drei Schaubilder Fig. 101a bis c. Aus Fig. 101c ergab sich durch Planimetrieren direkt $w_m = 3{,}08$ m/sek. Aus Fig. 101b aber folgt durch Planimetrieren $(wr)_m = 0{,}777$, daraus $w_m = \frac{0{,}777}{0{,}25}$ = 3,11 m/sek. Die Abweichung erklärt sich aus der Unsicherheit, in der man sich darüber befindet, wie am Rand die Kurve zu verlaufen habe. Diese Unsicherheit ist nach der Natur der Sache größer, als es nach Fig. 101 *a* scheint.

Die Einführung eines Staurohrs in wassergefüllte Leitungen kann mit gutem Erfolg durch eine nicht zu kurze einfache Führungsbuchse hindurch erfolgen, die man an die Rohrwand anschraubt (Fig. 102). Bei sehr großen Rohrweiten und großer Wassergeschwindigkeit muß man das Staurohr mit einem Fortsatz versehen, der diametral gegenüber der Einführungsstelle durch eine ebensolche Buchse herausgeht oder in einem Rohr geführt ist. Verwendung von Façonrohr von lanzettförmigem Querschnitt (in Messing und Eisen im Handel) verringert die Beanspruchung des Rohres durch Biegung seitens des Wasserstroms. Die Vase über der Austrittsbohrung wird mit Fett gefüllt, namentlich wenn das Rohr unter Vakuum stehen sollte. In diesem Fall bedarf man auch des Aspirators, um das Wasser ins Manometer zu saugen, der Wasserablaufschlauch muß die Länge entsprechend dem

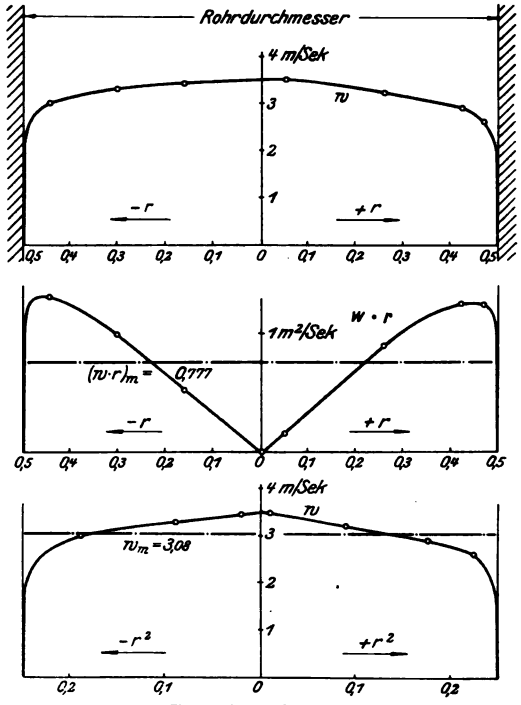


Fig. 101a bis c. Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeitsverteilung in einem kreisrunden Rohr.

Vakuum haben. Vermeidung aller Luftblasen in der Zuleitung zum Manometer ist wesentlich, aber schwierig. Bei Leitungen unter Druck muß man umgekehrt Luft in das Manometer drücken können; dazu bedient man sich bei höheren Drucken z. B. einer Fahrrad-Luftpumpe.

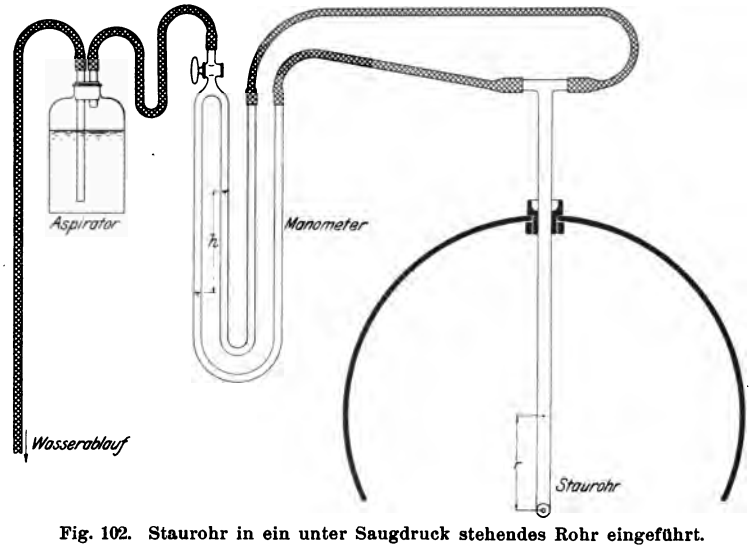


Fig. 102. Staurohr in ein unter Saugdruck stehendes Rohr eingeführt.

57. Wassermessung mittels Schirm. Die Schirmmessung kommt namentlich für Turbinengerinne in Anwendung. Sie ist erst in den letzten Jahren von Schweden aus bei uns bekannt geworden. Ein Stück des Turbinengerinnes ist sorgsam auf gleichmäßigen Querschnitt gebracht; in diesem Stück kann sich mit geringem Spiel ein Schirm mit dem strömenden Wasser bewegen, der die Geschwindigkeit des Wassers annimmt und sie messen läßt, indem man die Geschwindigkeit des den Schirm tragenden Wagens mißt. Fig. 103 zeigt die Anordnung. Bei *I* ist der Wagen in Ruhe, der Schirm hochgezogen; nach Lösen einer Sperrung fällt der Schirm in dem führenden **U**-Eisen herab, und der Wagen setzt sich in Bewegung; bei *II* ist er in Bewegung und durchläuft die Meßstrecke, die dadurch festgelegt ist, daß bei *A* und *B* elektrische Kontakte vom Wagen geschlossen werden. Nachdem der Wagen die Meßstrecke durchlaufen hat, stößt er gegen einen Anschlag, der ihn festhält, zugleich aber die Verbindung zwischen der unteren eintauchenden und der oberen geführten Hälfte des Schirmes löst; der untere Teil schwenkt durch Drehung aus dem Wasser aus. — Der Schirm und Wagen läßt sich unter Verwendung von Aluminium und nahtlosen Stahlrohren so leicht herstellen, daß seine Masse von vielleicht 40 kg gegenüber der Masse des

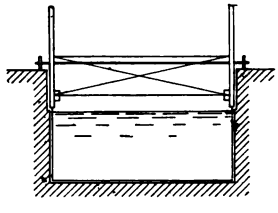
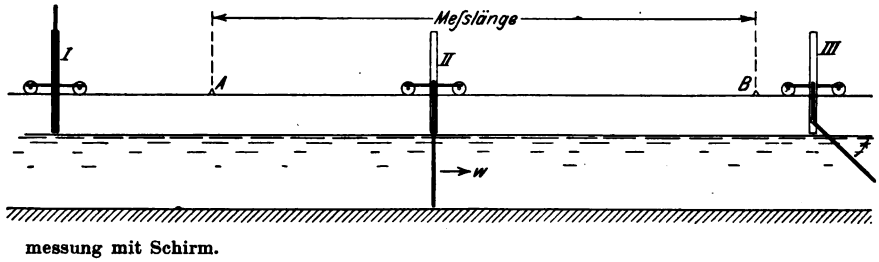


Fig. 103. Wasser-

Wassers ganz zurücktritt; das Einsenken hat daher kaum Einfluß auf die Wasserbewegung; auch der Widerstand des rollenden Wagens ist bei sorgsamer Verlegung der Geleise so gering, daß sich ein Stau von nur 1 bis 2 mm vor dem Schirm bildet; der spielt gegenüber der Wassertiefe keine Rolle; die durch den Spalt gehende Wassermenge läßt sich aber auch noch durch eine Korrektion berücksichtigen. Die Wagenbewegung wird durch Schließen der Kontakte *A* und *B*, besser noch durch einige Zwischenkontakte, festgelegt, indem diese Kontakte auf einem Papierstreifen Marken aufschreiben; wir kennen aus § 39 diese Art der Geschwindigkeitsmessung und wissen, daß es gut ist, neben die Ortsmarken noch Zeitmarken schreiben zu lassen, statt sich auf die gleichförmige Bewegung des Papierstreifens zu verlassen. Wenn man auf dasselbe Papierband noch eine dritte Markenreihe schreiben läßt, mittels eines Schreibzeuges, das von der Turbine bei jedem Umlauf betätigt wird, so hat man alle Angaben für die Turbinenuntersuchung beieinander, mit Ausnahme der Wasserstände; aber auch diese hat man auf den gleichen Streifen verzeichnen lassen. So vollkommene Einrichtungen wird man freilich nur in Versuchsanstalten zu dauernder Benutzung anordnen können; das Gerinne wird dann aus Stein sauber geputzt hergestellt. Für einzelne Bremsungen bei Abnahmeversuchen begnügt man sich mit einfacheren Einrichtungen; das Gerinne wird aus Holz gezimmert; Schirm und Wagen kann man transportabel herstellen und das Gerinne für sie passend machen. — Man hat die Schirmmessung bis herauf zu 15 cbm/sek verwendet; die Schirme von 6 m Breite bei 3,5 m Wassertiefe konnten dann nicht mehr bei jedem Versuch gehoben werden; vielmehr wurde eine Reihe Klappen in einem Rahmen angebracht, die sich gemeinsam schließen ließen und die zum Schluß gemeinsam selbsttätig geöffnet wurden. Andererseits hat sich durch Vergleich der Schirmmessung mit der Messung durch Ausflußöffnung gezeigt, daß der Schirm selbst bei Wassergeschwindigkeiten von 3 bis 5 mm/sek zuverlässig mißt. Sein



messung mit Schirm.

Meßbereich ist also sehr groß, dabei erfordert die Schirmmessung keine Koeffizienten und andere Hilfsmittel. Es besteht kein Zweifel, daß die Schirmmessung bei guten Hilfsmitteln die beste Art zur Messung großer Wassermengen ist.

58. Wehrmessungen. Wenn Wasser über ein Wehr hinwegfließt, wie Fig. 104 dies andeutet, so kann man, ähnlich wie bei Ausflußöffnungen,

aus der Standhöhe h des Wassers über der Wehrkante auf die überfließende Wassermenge schließen und letztere messen, indem man die Höhe h beobachtet.

Einem Wasserteilchen, das in der Tiefe x unter dem Oberwasserspiegel sich befindet, wird theoretisch eine Geschwindigkeit $w = \sqrt{2gx}$ erteilt. Mit dieser Geschwindigkeit fließt das Wasser in dem schmalen Streifen von der Höhe dx und der Länge b ab, wo b die Breite des Wehres, also die Länge der Wehrkante ist. Der Inhalt dieses Streifens ist $dF = b \cdot dx$ und das durch ihn sekundlich gehende Wasservolumen $dV = w \cdot dF = b \cdot dx \cdot \sqrt{2gx}$. Durch Integrieren zwischen den Grenzen $x = 0$ bis $x = h$ erhalten wir das theoretisch über das Wehr gehende Wasservolumen:

$$V' = b\sqrt{2g}\int_0^h \sqrt{x}\,dx = b\sqrt{2g}\left[\tfrac{2}{3}x^{\frac{3}{2}}\right]_0^h = \tfrac{2}{3}b\sqrt{2gh^3} \quad \ldots \quad (1)$$

Über jedes Meter der Wehrbreite sollte das Wasservolumen $V' = \frac{2}{3}\sqrt{2gh^3}$ fließen.

Wenn wir es als besonders günstig für die Messung mit Ausflußmündungen ansahen, daß die zu findende Wassermenge vom Quadrat der beobachteten Druckhöhe abhing, so ist es hier umgekehrt: die Potenz, in der V auftritt, ist diesmal sogar niedriger als die von h, bei verschiedenen Wassermengen sind die abzulesenden Druckhöhen also nur wenig voneinander verschieden. Außerdem wird man bei Wehrmessungen meist kleinere Druckhöhen haben. Beides wirkt dahin, kleinen Fehlern im Ablesen der Druckhöhe großen Einfluß zu geben; man muß die Druckhöhe sehr genau ablesen, und wo das nicht genügend genau geschieht, erhält man große Unsicherheiten. Trotzdem kann man Wehrmessungen für Messung großer Wassermengen, in Turbinengerinnen und dergleichen, oft nicht entbehren. —

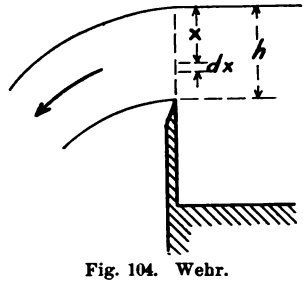


Fig. 104. Wehr.

In Wahrheit ergeben experimentelle Bestimmungen der über ein Wehr gehenden Wassermenge eine gegenüber dem theoretischen Wert zu geringe Wasserlieferung. Es fließt nur etwa V über, statt der theoretischen $V' = \frac{2}{3}b\sqrt{2gh^3}$. Das Verhältnis beider nennt man die *Ausflußziffer*, $k = \dfrac{V}{V'}$.

Die Tatsache, daß zu wenig Wasser über ein Wehr geht, erklärt sich teils durch Geschwindigkeitsverluste infolge von Reibung, namentlich aber durch Kontraktionserscheinungen. Wie Fig. 105 erkennen läßt, fängt der Wasserspiegel schon ein beträchtliches Stück vor dem Wehr an sich zu senken, so daß am Wehr die gemessene Tiefe h gar nicht mehr vorhanden ist. Auch von unten her kontrahiert sich der Strahl, wenn man dafür sorgt, daß unter ihn Luft treten kann, so daß er sich nicht am Wehr festsaugt; diese Belüftung des Wehres ist für Meßzwecke

immer nötig. Kontraktion tritt auch seitlich auf, wenn die Wehrbreite kleiner ist als die Breite des Zulaufkanales (Grundriß Fig. 105b). Nimmt das Wehr die volle Breite des Zulaufkanales ein (Grundriß Fig. 105c), so tritt keine Seitenkontraktion auf.

Die bei einer bestimmten abgelesenen Druckhöhe h über das Wehr gehende Wassermenge und damit der Ausflußkoeffizient k hängt von einer großen Reihe von Umständen ab. Zunächst spielt es eine Rolle, wo man die Ablesung von h bewerkstelligt, ob dicht hinter dem Wehr bei s, ob weiter ab bei s_1, Fig. 105a. Die erwähnte Senkung des Wasserspiegels läßt k größer erscheinen, wenn man bei s mißt. Verschiedene Werte von k ergeben sich auch, je nachdem man keine Seitenkontraktion hat, oder ob diese einerseits oder beiderseits auftritt. k ist auch von der Tiefe t des Zuflußgrabens abhängig, oder, genauer gesagt, von dem Verhältnis $t:h$; denn in einem flachen Zuflußgraben läuft das Wasser schnell, schon bevor es an das Wehr kommt, und wird daher am Wehr eine größere Endgeschwindigkeit annehmen, als wenn es durch einen tiefen Graben zugeflossen wäre. Bei schmalem Wehr und schmalem Zuflußgraben wird auch der Umstand von merklichem Einfluß sein, daß an den Seitenwänden die Wasserbewegung durch Reibung gehindert ist; k wird also mit zunehmender Wehrbreite etwas steigen.

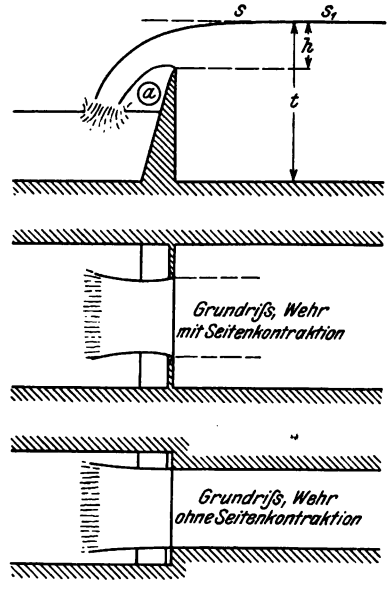


Fig. 105a—c. Kontraktionsverhältnisse von Wehren.

Diese und andere Umstände, die auf das Ergebnis Einfluß haben, erklären es, daß die Angaben verschiedener Experimentatoren über den Wert von k ziemlich voneinander abweichen. Die Ergebnisse der Versuche von Castel, Poncelet, Lesbros, Francis und Fteley-Stearns sind von Frese zusammen mit eigenen Versuchen in der Z. V. d. Ing. 1890 kritisch verarbeitet. Neuere Versuche von Hansen, Z. V. d. Ing. 1892, schließen sich den Freseschen Ergebnissen gut an.

Frese gibt für *Überfälle ohne Seitenkontraktion* den Wert

$$k_0 = 0{,}615 + \frac{0{,}0021}{h} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

worin h die Druckhöhe des Oberwasserspiegels über der Wehrkante in Metern bedeutet, gemessen so weit hinter dem Wehr, daß die Krümmung der Oberfläche noch keinen Einfluß hat. Die daraus folgenden Wassermengen sind in Fig. 106, starke Linie, für den Meßbereich, für welchen die Formel gilt, graphisch dargestellt.

Diese Werte k_0 gelten ohne weiteres, wenn die Geschwindigkeit des Wassers im Zulaufgraben so klein ist, daß sie keinen wesentlichen Einfluß ausübt — sie gelten für einen Zulaufgraben von unendlich großem Querschnitt. Im andern Fall wird mehr Wasser über das Wehr fließen, und wir haben k_0 noch mit einem Koeffizienten $\varepsilon > 1$ zu multiplizieren, dessen Wert von der Geschwindigkeit des Wassers im Zuflußgraben, also von dem Verhältnis Druckhöhe zu Kanaltiefe $h : t$ abhängt. Frese gibt $\varepsilon = 1 + 0{,}55 \left(\frac{h}{t}\right)^2$ an[1]).

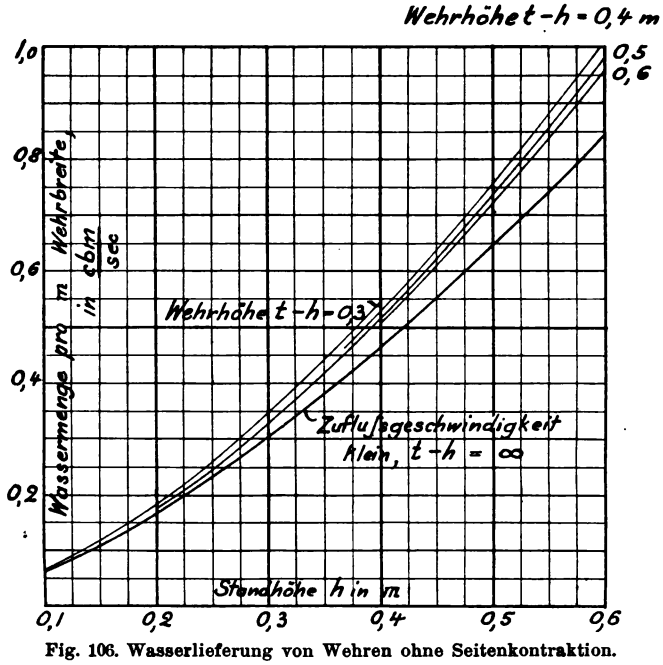


Fig. 106. Wasserlieferung von Wehren ohne Seitenkontraktion.

Aus den Werten ε und k_0 findet man den Ausflußkoeffizienten $k = \varepsilon \cdot k_0$, und damit die sekundliche Wassermenge $V = \frac{2}{3} k b \sqrt{2g} h^3 = 2{,}953\, k\, b \sqrt{h^3}$. Alle Angaben in diesen Rechnungen sind in Metern zu machen. Daraus folgen Wassermengen, wie sie die schwachen Kurven in Fig. 106 für verschiedene Wehrhöhen darstellen.

Für *Überfälle mit Seitenkontraktion* werden die Verhältnisse sehr viel verwickelter, weil der Betrag der Seitenkontraktion von der Breite B des Zulaufgrabens und der Wehrbreite b abhängt. Man sollte deshalb von Überfällen mit Seitenkontraktion zu Meßzwecken möglichst keinen Gebrauch machen, oder aber wenigstens dafür sorgen, daß die Abmessungen des Zuflußgrabens so groß sind, daß man die Zulaufgeschwin-

[1]) Dieser Koeffizient ist Hütte 1902, I, S. 231, falsch wiedergegeben (wohl nur in einem Teil der Auflage).

digkeit und den Einfluß der Wände auf die Kontraktion vernachlässigen kann. Für diesen Fall des *sehr weiten Zulaufgrabens* gibt Frese

$$k = 0{,}576 + \frac{0{,}017}{h + 0{,}18} - \frac{0{,}075}{b + 1{,}2}.$$

Man kann jedes Wehr in ein solches ohne Seitenkontraktion verwandeln, indem man oberhalb des Wehrs den Wasserlauf durch einen Bretterbelag auf die Wehrbreite einengt; in Fig. 105b deuten die punktierten Linien das an.

Das Wehr muß (Fig. 105) auf der Oberwasserseite eine senkrechte Wand bis an die Wehrkante hinan bilden, auf der anderen Seite muß es so steil abfallen, daß die Belüftung, eventuell durch Löcher *a* hindurch, gesichert ist. Die Wehrkante muß wagerecht und durchaus scharf sein; jede merkliche Abrundung oder Abflachung vergrößert den Wert von *k* in wechselndem Maße. Es scheint wenig Einfluß zu haben, ob bei Wehren ohne Seitenkontraktion der Strahl nach Verlassen des Wehrs noch durch Seitenwände eingeengt wird oder ob er sich frei ausbreiten kann. Das Wasser braucht hinter der Wehrkante nur so tief herabzufallen, daß die Belüftung gesichert ist: bei breiten Wehren muß man es ziemlich tief fallen lassen oder durch Rohrleitungen künstlich ventilieren. Kurzum, der Strahl soll hinter der Wehrkante durchaus frei sein. Die Wehrkante befreie man bisweilen von Schmutz durch Entlangfahren mit einem Stab. Die Wehrkante macht man meist aus behobeltem Eisen, doch dürfte auch ein sauber scharf behobeltes Brett genügen. Genau wagerecht montiert muß sie natürlich sein.

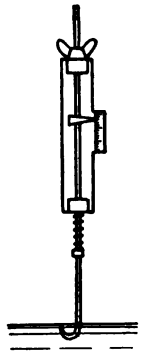


Fig. 107. Hakenmesser.

Die *Messung der Standhöhe h* muß so weit aufwärts erfolgen, daß noch kein Absenken der Oberfläche statthat. 1 m hinter dem Wehr zu messen, ist nach Hansen ausreichend, Francis maß 1,8 m, Frese 5 m hinter dem Wehr. Die Messung muß sorgfältig geschehen, weil es ungünstig ist, daß *h* in der Wehrformel in höherer Potenz steht als *V*, und weil es sich um nicht große Höhen handelt. Hansen hat eine Glasscheibe mit Skala in der Seitenwand des Gerinnes; das ist bequem, aber die Seitenwand wird oft nicht frei sein. Francis verwendet den Hakenmesser (Fig. 107): wenn die Spitze eben durch den Wasserspiegel tritt, kann man an der Skala die Druckhöhe ablesen. Statt einer Spitze verwendet Frese deren drei, die in einer Wagerechten liegen; die beiden unteren müssen den Wasserspiegel von unten, die obere muß ihn von oben berühren. Die Wellenbewegung des Wasserspiegels ist bei der Messung lästig: man beobachtet am besten in einem Meßbrunnen aus Holz, in den das Wasser nur von unten durch ein Loch eintritt. Nach Francis kann man auch ein Brett *B* mit einem Loch in die Gerinnesohle stellen, parallel zur Stromrichtung, und von dem Loch aus ein Bleirohr *a* (Fig. 108) irgendwohin führen und in einen Meßbrunnen *M* von solcher Weite enden lassen, daß die Kapillarität nicht stört. Ist die Bleileitung dicht, so erhält man korrekte Messungen, selbst wenn die Leitung dicht hinter dem Wehr mündet: durch die Sen-

kung des Spiegels wird also der Wasserdruck an der Gerinnesohle nicht beeinflußt.

Über die Wahl der *Wehrbreite* ist zu bemerken: Die Druckhöhe h des Wassers soll nicht unter 0,1 m, besser nicht unter 0,2 m sein, sonst geben die Freseschen Formeln k nur schlecht wieder. Die Druckhöhe soll sogar möglichst groß sein, damit die Meßfehler relativ klein werden. Man wähle also die Wehrbreite b möglichst klein, doch soll sie bei fehlender Seitenkontraktion nicht kleiner als h sein, sonst wird die Reibung an den Seitenwänden störend. Versuche liegen nur mit Druckhöhen h bis zu 0,5 m vor, doch dürfte die Formel darüber hinaus verwendbar sein, sollte es nötig werden.

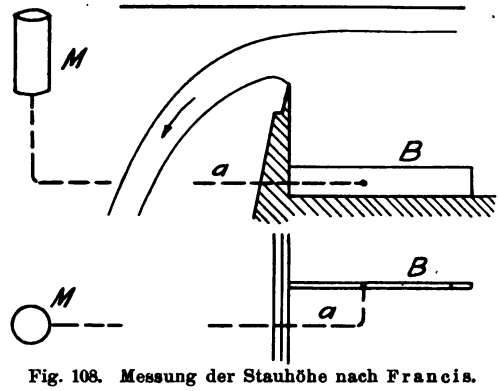


Fig. 108. Messung der Stauhöhe nach Francis.

Als Höhe des Wehres $t - h$, Fig. 105a, genügt 0,3 m.

59. Ausflußöffnungen an Gefäßen. Ist in der Wand eines wassergefüllten Gefäßes, Fig. 109, eine Öffnung vorhanden, so tritt Wasser aus mit einer Geschwindigkeit w, die von der Standhöhe h des Wassers über der Öffnung abhängt. Im Strahl tritt die *Geschwindigkeitshöhe* $\frac{w^2}{2g}$ an die Stelle der *Druckhöhe* h, daher gilt:

$$h = \frac{w^2}{2g}; \quad w = \sqrt{2gh} \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

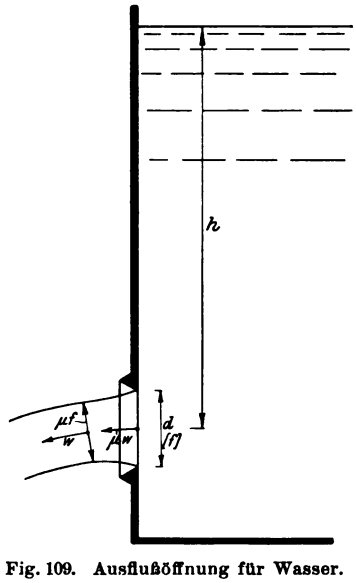


Fig. 109. Ausflußöffnung für Wasser.

hierin ist $g = 9{,}81$ m/sek² die Schwerebeschleunigung; man erhält w in m/sek, wenn man h in Metern angibt.

Hat die Ausflußöffnung einen Durchschnitt d m und einen Querschnitt f qm, so sollte das austretende Volumen

$$V' = f \cdot \sqrt{2gh}\ \text{cbm/sek} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

sein. Kennt man also den Mündungsquerschnitt f, so kann man aus der Standhöhe des Wassers auf die ausfließende Wassermenge schließen. Fließt von oben eine zu messende Wassermenge zu, so wird der Wasserspiegel so lange steigen, bis zu- und abfließende Wassermenge einander gleich sind: dann stellt er sich konstant ein, und man kann ablesen. Man sieht, daß die Meßmethode

zunächst nur da brauchbar ist, wo das Wasser ganz oder annähernd gleichmäßig fließt.

Handelt es sich um eine andere Flüssigkeit als Wasser, so wird das theoretische Ausflußvolumen V' nach der gleichen Beziehung folgen: der Ausfluß unter dem Druck entsprechend einer Flüssigkeitssäule der betreffenden Flüssigkeit von h m Höhe erfolgt mit der Geschwindigkeit $w = \sqrt{2gh}$ m/sek; das austretende Volumen folgt aus Gleichung (2), das austretende Gewicht wird

$$G' = f \cdot \gamma \cdot \sqrt{2gh} \text{ kg/sek} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

worin γ kg/cbm das spezifische Gewicht des ausfließenden Mittels bei den betreffenden Temperatur- und Druckverhältnissen ist.

Der vorletzte Satz macht darauf aufmerksam, daß an Stelle der Messung in Flüssigkeitssäule auch eine Druckmessung, etwa mittels Manometers, erfolgen kann; nur muß man, wenn der Druck in Atmosphären oder kg/qm gemessen wurde, eine Umrechnung in Meter Flüssigkeitssäule ausführen. Dazu bedient man sich der auf S. 50 abgeleiteten Beziehung, wonach h m Flüssigkeitssäule vom spezifischen Gewicht γ kg/cbm einen Druck $h \cdot \gamma$ kg/qm auf ihre Unterlage ausüben; oder es ist

$$h \text{ m Fl S} = \frac{p \text{ kg/qm}}{\gamma \text{ kg/cbm}}.$$

Man beachte, daß diese Gleichung auch dimensionsrichtig ist.

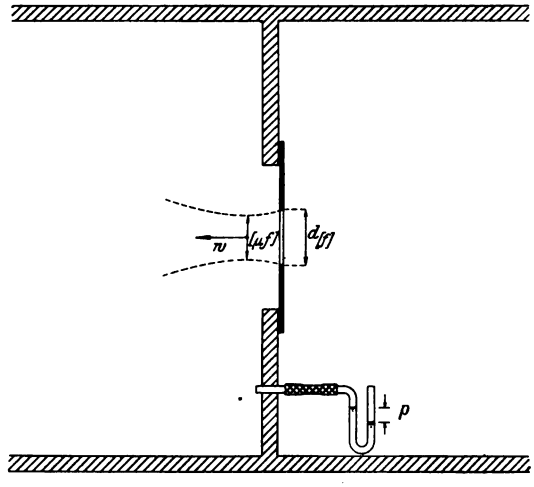


Fig. 110.
Ausflußöffnung für Luft.

Und nun gilt das gleiche auch für Gase und für Dampf, bei denen nur der Druck gemessen werden kann. Strömt ein Gas aus einem Raum ins Freie oder einen anderen von genügender Weite, durch die Öffnung Fig. 110 hindurch und herrscht ein gegenüber dem absoluten Druck p_1 nur kleiner Druckunterschied $p_1 - p_2 = p$ kg/qm $= p$ mm WS zwischen beiden Räumen, hat dabei das Gas beim Druck p_2 das spezifische Gewicht γ kg/cbm, so erfolgt der Ausfluß unter dem Überdruck $\frac{p}{\gamma}$ Meter Gas- oder Dampfsäule. Es entsteht eine Geschwindigkeit, folgend aus

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{p}{\gamma} = h = \frac{w^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1a)$$

Bei f qm Querschnitt der Ausflußöffnung hat man die Ausflußmenge, dem Volumen nach

$$V' = f \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p}{\gamma}} \text{ cbm/sek} \quad \ldots \ldots \quad (2a)$$

zu erwarten. Dem Gewicht nach sollte $G' = V' \cdot \gamma$ oder

$$G' = f \cdot \sqrt{2g\gamma \cdot p} \text{ kg/sek} \quad \ldots \ldots \quad (3a)$$

austreten.

Diese letzten Ausdrücke gelten also allgemein, für Gas und Dampf jedoch mit dem Vorbehalt, daß es sich nur um Ausgleich von Druckunterschieden handelt, die klein sind im Verhältnis zum absoluten Druck; sie dürfen etwa 5 bis allerhöchstens 10% desselben ausmachen. Andernfalls wäre der Ausfluß von Gasen und Dämpfen nicht mehr ein mechanischer, sondern ein thermodynamischer Vorgang, da mit der Druckabnahme eine Zunahme des Volumens und eine (geringe) Abnahme der Temperatur, bei Dampf wohl auch eine Abnahme des Wassergehaltes stattfindet, so daß also γ keinen bestimmten Wert mehr hat; für Meßzwecke wird man ohnehin nur einen kleinen Druckverlust zulassen, um die Arbeitsverluste tunlichst einzuschränken. —

Das durch eine Öffnung austretende Volumen sollte also

$$V' = f \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p}{\gamma}} \quad \text{oder aber} \quad V' = f \cdot \sqrt{2gh}$$

sein. In Wahrheit ist es ein anderes, meist kleiner, nämlich V. Dann bezeichnet man das Verhältnis $\frac{V}{V'} = k$ als *Ausflußziffer*. Über die Größe von k sprechen wir sogleich: kennt man k, so ist das wirklich ausfließende Volumen

$$V = k \cdot f \sqrt{2gh} \quad \ldots \ldots \quad (4)$$

oder

$$V = k \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p}{\gamma}} \quad \ldots \ldots \quad (4a)$$

und das wirklich ausfließende Gewicht

$$G = k \cdot f \cdot \gamma \cdot \sqrt{2gh} \quad \ldots \ldots \quad (5)$$

oder

$$G = k \cdot f \cdot \sqrt{2g\gamma \cdot p} \quad \ldots \ldots \quad (5a)$$

Bezieht man die Konstante $\sqrt{2g}$ in die Ausflußzahl ein, so hat man, für die Rechnung bequemer, aber weniger durchsichtig in der Herkunft

$$V = k' \cdot f \cdot \sqrt{h} = k' \cdot f \cdot \sqrt{\frac{p}{\gamma}} \quad \ldots \ldots \quad (4b)$$

$$G = k' \cdot f \cdot \gamma \cdot \sqrt{h} = k' \cdot f \sqrt{\gamma p} \quad \ldots \ldots \quad (5b)$$

$$\text{mit} \quad k' = k \cdot \sqrt{2g} \quad \ldots \ldots \quad (6)$$

Für Ausflußöffnungen wird entweder die scharfkantige „*Mündung*“ oder aber die abgerundete „*Düse*“ verwendet[1]).

Für beide Formen entsteht ein mäßiger Geschwindigkeitsverlust gegenüber der theoretisch erzielbaren Geschwindigkeit $w = \sqrt{2gh}$.

Für die scharfkantige Mündung Fig. 111a findet außerdem hinter dem Öffnungsquerschnitt eine Einschnürung des ausfließenden Strahles statt. Das Verhältnis des kontrahierten Querschnittes zu dem der Mündung heißt die *Kontraktionsziffer* μ; der kontrahierte Querschnitt hat also die Größe μf. Die Kontraktionszahl μ ist ein wenig größer als die Ausflußzahl k, infolge des durch die Reibung verursachten Geschwindigkeitsverlustes. Doch soll hier und namentlich später für die Durchflußöffnungen (§ 61) der Reibungsverlust sogleich in die Kontraktionszahl eingeschlossen werden, so daß also hier (aber nicht später für die Durchflußöffnungen) $k = \mu$ wird. Die Geschwindigkeit $w = \sqrt{2gh}$ (vermindert um den geringen Betrag der Reibungsverluste) stellt sich im kontrahierten Querschnitt ein, im Mündungsquerschnitt herrscht demnach eine kleinere Geschwindigkeit $\mu \cdot w$.

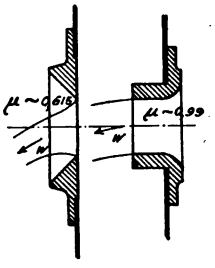


Fig. 111a und b. Ausflußöffnungen für Wasser.

Die Ausflußziffer der Formel (4) bis (6) ist anzunehmen:

in einfacher Mündung

für Wasser nach Weisbach $k = 0{,}615$, also $k' = 2{,}72$,
für Luft nach A. O. Müller $k = 0{,}60$, also $k' = 2{,}66$.

In der abgerundeten Düse Fig. 111b tritt bei ausreichender Abrundung eine Kontraktion nicht auf. Je nach der Sorgfalt, mit der die Düse poliert ist, nimmt die Ausflußziffer Werte an

in abgerundeter Düse $k = (0{,}98$ bis$)\ 1$, also $k' = (4{,}35$ bis$)\ 4{,}43$.

Diese Werte dürften für Wasser und für Luft in gleicher Weise gelten; im allgemeinen wird man für Luft eher den niedrigeren Wert zu nehmen haben, wenn der Druckabfall nicht sehr klein ist im Verhältnis zum absoluten Druck, so daß schon eine merkliche Abnahme von γ eintritt. — Für Dampf gibt Bendemann

für abgerundete Düsen $k = 0{,}93$, also $k' = 4{,}12$

an; der Wert enthält bereits eine empirische Berücksichtigung der thermodynamischen Vorgänge beim Ausfluß und gibt eine Genauigkeit von $\pm 2\%$, wenn man den Druckabfall höchstens 7% des absoluten Anfangsdruckes werden läßt.

Man sollte möglichst eine *Eichung* der Öffnung bei den Druck- und Temperaturverhältnissen wie bei der Messung vornehmen, das heißt also für die besonderen Verhältnisse empirisch die Beziehung zwischen Druck und Ausflußmenge feststellen. Man braucht sich dann nicht auf die Angabe der Ausflußziffern zu verlassen, deren Wert im Einzelfall

[1]) Die durch diesen Satz festgelegte Unterscheidung zwischen den Begriffen Öffnung, Mündung und Düse ist sprachlich nicht selbstverständlich, folgt aber einem schon vielfach geübten Gebrauch und soll im folgenden durchgeführt werden.

von manchen Umständen abhängt. Insbesondere ist recht wenig darüber bekannt, wie weit die für Wasser und Luft vorliegenden Zahlen auf andere Flüssigkeiten und Gase angewendet werden können, wieviel Einfluß Unreinigkeiten des Wassers, Feuchtigkeit der Luft, Abweichungen des Druckes und der Temperatur haben. An scharfkantigen Mündungen haben auch geringe Verletzungen der scharfen Kante großen Einfluß. Die Messung der oft kleinen Durchmesser ist nur schwer genügend genau zu machen und geht doch im Quadrat ins Ergebnis ein. — Eine besondere Eichung scheint auf den ersten Blick umständlich zu sein: warum benutzt man nicht direkt die Wage oder die anderen unmittelbaren Methoden, wenn man ihrer doch nicht entraten kann? Man bedenke aber, daß man eine Mündung nur einmal für eine Reihe von Durchgangsmengen zu eichen braucht und dann Zwischenwerte graphisch interpolieren kann, daß dann aber eine einmalige Eichung für sehr zahlreiche Versuche genügen kann, deren jeder nur eine Momentanablesung erfordert, die viel bequemer zu machen ist als eine Wägung oder dergleichen. Auch kann man eine Mündung nach der Eichung leicht an andere Orte transportieren, leichter als Wagen oder gar Windkessel und Gasuhren. Endlich ist noch die Möglichkeit zu erwähnen, mehrere Mündungen einzeln zu eichen und durch Parallelschalten derselben Mengen von Luft oder Wasser zu bewältigen, für die die verfügbaren Meßmittel sonst nicht ausreichen.

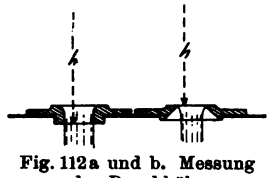


Fig. 112a und b. Messung der Druckhöhe.

Eine große Druckhöhe ist aus doppeltem Grunde erwünscht; da bei Messung der Druckhöhe immer die gleiche Ungenauigkeit gemacht wird, so ist die Ungenauigkeit bei größerer Druckhöhe relativ kleiner. Außerdem aber ändert sich die Druckhöhe mit dem Quadrat der Ausflußmenge: $V = kf\sqrt{2gh}$. Daher wird die Änderung der Druckhöhe mit der Ausflußmenge um so bedeutender sein, je größer die Druckhöhe selbst ist. — Daß die gesuchte Größe V vom Wurzelwert der beobachteten, h, abhängt, hat zur Folge, daß bei kleinen Geschwindigkeiten die abzulesende Druckhöhe sehr klein und ungenau abzulesen ist. Dafür wird in dem Meßbereich, für den die Druckhöhe bequem abzulesende Werte hat, die Ablesung um so genauer (§ 17).

Wollen wir bei einem längeren Versuch die Druckhöhen regelmäßig ablesen, um daraus die mittlere sekundliche Ausflußmenge zu finden, so ist es nicht ganz korrekt, den Mittelwert der Druckhöhen zu bilden und aus ihm die mittlere Ausflußmenge zu berechnen; denn die Wurzel aus dem Mittelwert ist nicht das gleiche wie der Mittelwert aus den Wurzeln. Es ist zu jeder einzelnen Druckhöhe die zugehörige Ausflußmenge zu finden und aus diesen das Mittel zu bilden. Bleiben die Schwankungen der Druckhöhe gering, etwa unter 10%, so ist der Unterschied zwischen beiden Rechnungsarten gering (§ 15). Oder man rechne mit dem Wurzelmittelwert (S. 24).

Für Flüssigkeiten insbesondere ist noch folgendes zu bemerken: Druckhöhe h der Flüssigkeit über der Mündung hat man bei seitlichem

Ausfluß bis Mitte Öffnung zu messen (Fig. 118), bei Ausfluß durch den Boden bis zu der Höhe, wo der Wasserstrahl sich vom Gefäß löst (Fig. 112). Die Druckhöhe soll mindestens so groß sein, daß die Wasseroberfläche über dem ausfließenden Strahl nicht irgendwie gestört ist. Zu kleine Druckhöhe verändert bei scharfer Mündung den Ausflußkoeffizienten k. Man verwendet wohl Ausflußgefäße nach Fig. 113 mit einer Anzahl Öffnungen verschiedener Größe, die aber in gleicher Höhe liegen und die man nach Bedarf verschließt, so daß bei jeder Wassermenge die Druckhöhe passend wird. Bei a läuft das Wasser zu, die Scheidewände beruhigen es, so daß über den Mündungen ein glatter Spiegel steht. Die Druckhöhe mißt man mit einem einfachen Maßstab, den man eintaucht und auf halbe oder zehntel Zentimeter abliest. Man kann auch den bei den Wehrmessungen beschriebenen Hakenmesser (Fig. 107) oder ein Wasserstandsglas mit Skala verwenden.

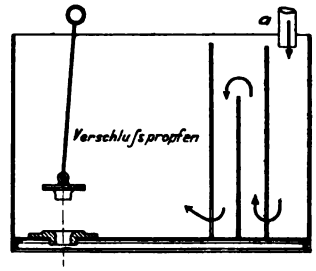


Fig. 113. Transportables Meßgefäß mit Ausflußöffnungen.

Bei großen Wassermengen benutzt man nicht eine große Mündung; diese wäre schwer zu eichen, sondern mehrere kleine. Die Gesamtausflußmenge ist die Summe der einzelnen Mengen. Die Öffnungen dürfen nicht zu dicht beieinander sein, damit die gegenseitige Beeinflussung gering bleibt und der Ausflußkoeffizient sich nicht ändert; sie dürfen auch nicht dem Boden oder der Seitenwand des Ausflußbehälters zu nahe sein, sonst tritt das gleiche auf. Aus der später zu besprechenden Fig. 114 wird man folgern dürfen, das jede Öffnung ein Feld um sich herum frei für sich haben muß, dessen Durchmesser das Zwei- bis Dreifache des Öffnungsdurchmessers ist: zwei Öffnungen von den Durchmessern d_1 und d_2 sollten also mindestens den Abstand $2{,}5\,d_1$ bzw. $2{,}5\,d_2$ von der Gefäßwand und $2{,}5\,(d_1 + d_2)$ voneinander haben; auch für die Standhöhe wird man $2{,}5\,d_1$ (alles von Mitte Öffnung an gerechnet) als äußerstes Mindestmaß annehmen dürfen (Fig. 114).

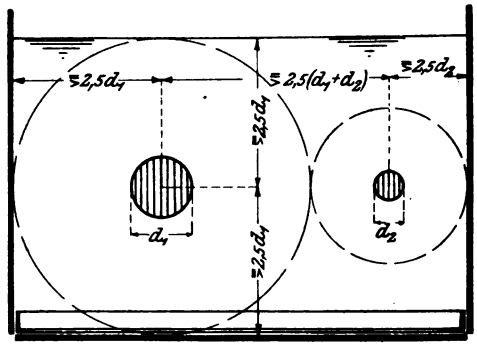


Fig. 114. Mindestmaße für die Anordnung der Ausflußöffnungen.

Bei stark schwankenden Ausflußmengen kann man sich auch folgender Methode bedienen, die für Wassermessung von Brauer angegeben ist, aber auch sonst manchmal verwendbar ist: Man läßt die zu messende Ausflußmenge aus mehreren Öffnungen austreten, wobei dafür zu sorgen ist, daß für alle gleiche Verhältnisse, insbesondere hinsichtlich der

Druckhöhe, vorliegen. Die einzelnen Ausflußmengen verhalten sich dann wie die Mündungsquerschnitte, oder doch jedenfalls wie die Produkte $k \cdot f$, bleiben also bei allen Druckhöhen einander proportional. Die aus einer der Mündungen kommende Menge wird dann irgendwie gemessen, bei Wasser etwa durch Wägen, bei Luft durch eine Luftuhr. Dadurch kann man, ähnlich wie bei Anwendung der Mischungsregel, § 49, große Mengen mit kleinen Meßapparaten bewältigen. — Für Luft hätte man das *Brauersche Verfahren* so anzuwenden, daß man das aus einer Mündung gehende Volumen mittels einer Luftuhr mißt.

Darüber, ob die scharfkantige *Mündung oder* die abgerundete *Düse* vorzuziehen ist, gilt Folgendes. Die Mündung hat den Vorteil bequemer Herstellung für sich, der namentlich bei den Anwendungsformen des folgenden Paragraphen — beim Anschluß an eine Rohrleitung — zur Geltung kommt. Eine einfache nach Art des Blindflansches hergestellte Blechscheibe, mit einem sauberen Loch versehen, genügt.

Sachlich vorzuziehen ist die abgerundete Düse. Bei der scharfkantigen Mündung verändert sich die Ausflußziffer, sobald die Kante nicht ganz scharf ist; die scharfe Kante wird leicht verletzt, so schon beim Messen des Durchmessers. Die abgerundete ist Verletzungen weniger ausgesetzt. Auch spricht folgendes für Verwendung abgerundeter Mündungen: Nicht selten hat man warmes oder unreines Wasser zu messen oder auch andere Flüssigkeiten als Wasser, etwa die Sole in Kälteanlagen, die mehr oder weniger konzentriert sein kann. Man ist selten in der Lage, eine Eichung der Öffnung mit warmem Wasser oder mit Sole vorzunehmen, man überträgt einfach die mit kaltem Wasser gefundenen Werte von k auf die anderen Verhältnisse Bei scharfer Mündung findet Kontraktion statt, und es ist wohl möglich, daß diese unter anderen Verhältnissen in anderem Betrage auftritt; bei abgerundeter Düse findet für kaltes Wasser keine Kontraktion statt, weshalb sollte sie bei anderen Flüssigkeiten plötzlich auftreten? Die Reibung aber kann nur unbedeutende Schwankungen im Werte von k veranlassen. Veränderte Bedingungen werden um so weniger Einfluß auf den Wert von k haben, je weniger k selbst von der Einheit abweicht.

Betreffs der schwierigen Herstellung von Mündungen ist noch besonders darauf hinzuweisen, daß eine genügende Abrundung und ein genügend langes gut zylindrisches Stück wesentlich ist. Um Ablösungserscheinungen zu vermeiden, wird der Abrundungsradius am zylindrischen Teil schätzungsweise mit dem Mindestwert $\varrho = \frac{1}{2} d$ beginnen müssen.

60. Ausflußöffnungen an Rohrleitungen. Wenn nach Fig. 115 der Ausfluß der Flüssigkeit nicht aus einem praktisch unendlich großen Behälter, sondern aus einer Rohrleitung heraus erfolgt, deren Durchmesser wir mit D und deren Querschnitt wir mit F bezeichnen wollen (während d und f die entsprechenden Abmessungen der Öffnung sind), so werden die Verhältnisse in doppelter Weise geändert.

Bei Verwendung scharfkantiger Mündungen wird nämlich die Kontraktion des austretenden Strahles eine unvollkommene werden; die Kontraktionszahl (unter welchem Ausdruck wir im folgenden immer die Ausflußzahl des vorigen Absatzes verstehen wollen, obwohl sie sich

eigentlich um die geringfügigen Reibungsverluste von ihr unterscheidet) wird von dem Wert $\mu = 0{,}615$, den sie für sehr kleines *Öffnungsverhältnis*, $f : F = m \sim 0$, haben muß, steigen bis auf $\mu = 1$; diesen Wert muß sie annehmen, wenn beim Öffnungsverhältnis $m = 1$, beim einfachen Ausfluß aus dem Rohr, Kontraktion gar nicht mehr auftritt. Den Verlauf der Kontraktionszahl μ bei Wasser als abhängig vom Durchmesserverhältnis $d : D = \sqrt{m}$ gibt die eine Kurve der Fig. 116.

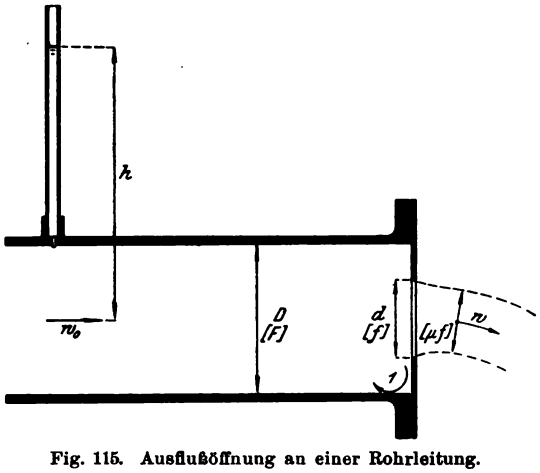


Fig. 115. Ausflußöffnung an einer Rohrleitung.

Für scharfkantige Mündungen wie für abgerundete Düsen bleibt zweitens zu beachten, daß diesmal die Druckhöhe h nicht zur Erzeugung der Geschwindigkeit w dient, sondern zur Erhöhung der *Vorgeschwindigkeit* w_0 im Rohr auf die Geschwindigkeit w im Strahl. Also gilt:

$$h = \frac{w^2}{2g} - \frac{w_0^2}{2g}.$$

Nun ist aber $w_0 = \frac{w}{\mu m}$; hierdurch w_0 beseitigt, entsteht

$$h = \left(1 - \frac{1}{(\mu m)^2}\right) \cdot \frac{w^2}{2g}.$$

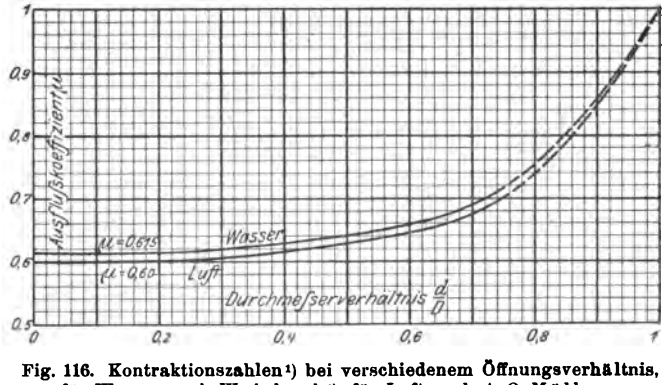


Fig. 116. Kontraktionszahlen[1]) bei verschiedenem Öffnungsverhältnis, für Wasser nach Weisbach[2]), für Luft nach A. O. Müller.

[1]) Das Wort Ausflußkoeffizient in der Figur ist zu berichtigen.
[2]) Vgl. die Anmerkung auf S. 148.

Setzen wir:

$$1 - \frac{1}{(\mu m)^2} = \frac{1}{k^2},$$

$$k = \frac{\mu m}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

so wird also

$$h = \frac{1}{k^2} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad \text{oder} \quad w = k \cdot \sqrt{2gh}$$

und das ausfließende Volumen wird, wie früher,

$$V = k \cdot f \cdot \sqrt{2gh} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Messen wir statt der Druckhöhe h den Druckabfall $p = p_1 - p_2$ in kg/qm — insbesondere für Ausfluß von Gasen, § 59 —, so wird wie früher:

$$V = k \cdot f \cdot \sqrt{2g\frac{p}{\gamma}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4a)$$

Bei Verwendung abgerundeter Düsen — die immer den Vorteil größerer Meßsicherheit durch Vermeidung der Kontraktion, aber den Nachteil schwieriger Herstellung haben — wird mit $\mu = 1$

$$k = \frac{m}{\sqrt{1 - m^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7a)$$

Auch für den Fall also, daß die Vorgeschwindigkeit nicht gegenüber der Ausflußgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann, gilt die quadratische Beziehung zwischen w oder V und h oder p. Nur hat man als Ausflußzahl nicht die einfache Kontraktionszahl μ bzw. diejenige Zahl einzuführen, die wir in § 59 als Ausflußzahl bezeichneten, sondern den aus ihr und dem Querschnittsverhältnis m nach Formel (7) und (7a) folgenden Wert.

Die Werte μ Fig. 116 für Wasser sind von Weisbach vermutlich an Rohren kleinen Durchmessers gewonnen. Trotz der Zuverlässigkeit Weisbachscher Versuche wird man sie also mit Vorsicht benutzen müssen; der punktierte Teil ist überdies schätzungsweise vervollständigt, um den Verlauf zu zeigen[1]). Trotzdem wird in Fig. 117 die Ausflußzahl k der Formeln (7) und (7a) in Abhängigkeit von $d : D = \sqrt{m}$ wiedergegeben. In die Figur ist auch noch ein Wert $K = m\,k$ eingetragen. Mit ihm ist

$$V = \frac{K \cdot f}{m} \sqrt{2gh} = K \cdot F \cdot \sqrt{2gh} \quad \ldots\ldots \quad (4c)$$

$$K = \frac{\mu m^2}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7b)$$

[1]) Die Kurve ist angefertigt nach Forschungsarbeit Heft 49, S. 51. Die Werte bei Weisbach selbst (Ingenieurmechanik 3. Aufl. S. 766 oder 5. Aufl. S. 1046) weichen namentlich für die großen Durchmesserverhältnisse merklich davon ab. Sie lauten

$m = F : f =$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\mu =$	0,624	0,632	0,643	0,659	0,681	0,712	0,755	0,813	0,892

K stellt also eine auf den Rohrquerschnitt bezogene Ausflußziffer dar, genau wie k sie auf den Öffnungsquerschnitt bezieht. Mit K rechnet es sich besser, wenn man f und d erst so bestimmen will, daß man auf einen gut meßbaren Druckabfall kommt. Mit k rechnet man besser, zumal bei kleinen Werten m, bei der Auswertung. Für die praktische

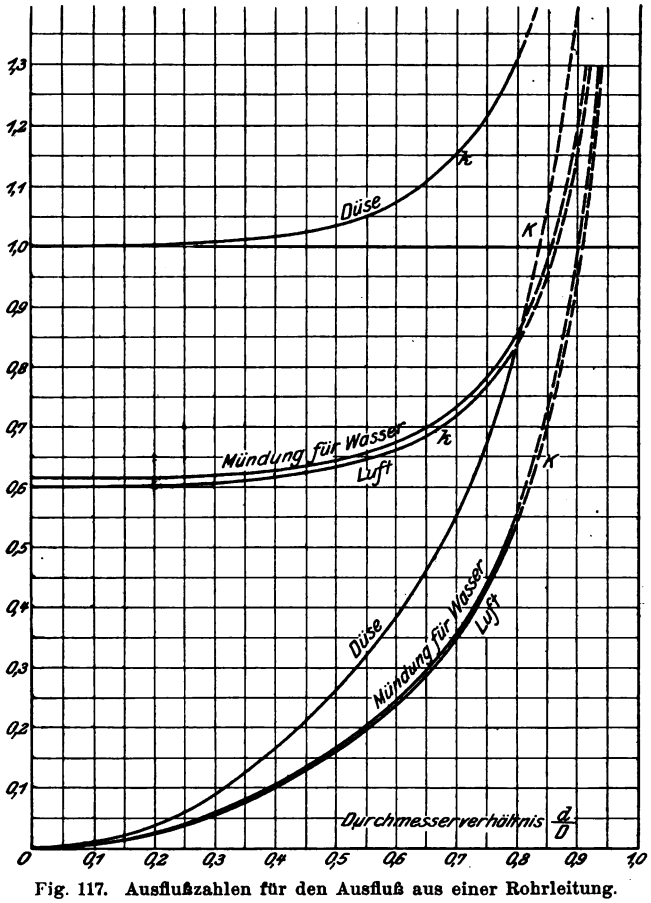


Fig. 117. Ausflußzahlen für den Ausfluß aus einer Rohrleitung.

Berechnung zieht man außerdem zweckmäßig $\sqrt{2g} = 4{,}43$ mit in die Ausflußzahl ein und rechnet mit den Beziehungen

$$\left.\begin{aligned} V &= k' \cdot f \cdot \sqrt{h} = K' \cdot F \sqrt{h} \\ k' &= 4{,}43\, k\,; \quad K' = 4{,}43\, \mathrm{K} \end{aligned}\right\} \tag{6a}$$

Sobald die Vorgeschwindigkeit merkliche Werte annimmt, ist nicht mehr gleichgültig die Art der *Entnahme des Druckes*. In Fig. 118 sind zwei von Fig. 115 verschiedene Arten dargestellt. Man kann den Druck dem Zuflußrohr seitlich entnehmen, Fig. 115; diese nächstliegende Art

der Entnahme hat den Nachteil, daß sie durch die Vorgeschwindigkeit w_0 in unberechenbarer Weise gestört werden kann, namentlich sobald die Entnahmeöffnung nicht sehr sauber von Grat befreit ist; Schärfe oder Rundung der Öffnungskanten, Neigung der Öffnungsachse gegen die Rohrachse u. a. m. haben Einfluß durch Wirbelbildung. Auch muß man genügend weit von der Mündung zurückgehen, um nicht in den Bereich der Wirbel zu kommen, die nahe der Mündung etwa nach Pfeil *1* zu verlaufen scheinen. Versuche mit Luft wenigstens[1]) ergaben bis zu 10% verschiedene Drucke je nach der Entfernung vor der Öffnung, wo die Druckentnahme stattfand. Man soll demnach um Strecken zurückgehen, die zu 3 D bis 8 D angegeben werden. Dann aber spielt bei kleinen Druckhöhen der Druckverlust durch Reibung zwischen Entnahme und Öffnung bereits eine merkliche Rolle, verschieden je nach der Rauheit des Rohres. In jedem Fall bleibt die Entnahmestelle willkürlich gewählt.

Deshalb empfiehlt Brandis die Entnahme des Druckes nach Fig. 118a. Der Druck soll auf der Scheibe, jedoch in der Ecke gegen die Rohrwand entnommen werden, also so, daß die Bohrung in eine Mantellinie des Rohres fällt. Diese Entnahmestelle hat theoretisch den Vorzug, genau definiert zu sein und den Einfluß der Rohrreibung ganz auszuschalten. Praktisch hat Brandis (immer freilich für Luft) dafür nachgewiesen, daß der Zusammenhang zwischen Ausflußmenge und Druckmessung ein gut eindeutiger und unabhängig ist von Wirbelungseinflüssen nach Pfeil *1*, Fig. 115; insbesondere ist es auch nur bei sehr kleinen Randbreiten $\frac{D-d}{2}$ wesentlich, daß man ganz in der Ecke mißt. Der abzulesende Druck nimmt zwar gegen die Mündung hin ab, nähert sich aber gegen die Ecke hin seinem Höchstwert asymptotisch, sofern eben die Randbreite es zur Ausbildung dieser Erscheinung kommen läßt.

Nur dann bleibt auch die Messung nach Fig. 118a ungenau definiert, wenn die Strömung nicht um den Strahl herum allseits gleichmäßig angeordnet ist. Die Druckentnahme an einem Punkt des Umfanges genügt nur dann, wenn die Rohrleitung ein genügendes Stück vor der Drosselscheibe geradlinig verläuft: Brandis gibt 8 D als hierfür erforderlich an. Sonst aber, wenn also Krümmungen oder Hindernisse in kürzerem Abstand — mindestens jedoch etwa 3 D — vor der Scheibe sind, muß man den Druck auf der Scheibe an mehreren Stellen des Rohrumfanges messen, um den Mittelwert zu bilden (doch wohl den Wurzelmittelwert, S. 24). Für zahlreich auszuführende Messungen wird man bequemer den Mittelwert mechanisch bilden, indem man die einzelnen Meßstellen mit einer Ausgleichkammer verbindet und darin den Druck mißt. Bedingung ist, daß die hydraulischen Widerstände der einzelnen Zuleitungen zur Ausgleichkammer alle gleich sind; sonst entfernt sich der Druck in der Kammer vom Mittelwert. Die Bedingung ist am einfachsten durch Anordnung einer Ringkammer genügender Weite nach Fig. 118b zu erfüllen, von der eine Reihe genügend feiner Bohrungen gleichen Durchmessers durch den Staurand hindurch führen.

[1]) Brandis, s. Literaturverzeichnis.

Wegen des verschiedenen Einflusses der Vorgeschwindigkeit auf die Entnahmestelle nach Fig. 115 einerseits (vermutlich Saugen), Figur 118 andererseits (vermutlich Drücken) werden die versuchsmäßig zu bestimmenden Vorzahlen k für beide Fälle verschieden ausfallen können. Man hat dann bei Versuchen die Regeln zu beachten, die für Gewinnung der Vorzahlen maßgebend waren. Vorläufig aber gibt es für Wasser m. W. Versuche gar nicht, und man muß im Notfall die Werte der Fig. 117 benutzen, ohne daß sich über die Art der Druckentnahme Bestimmtes sagen ließe. Man vermeide aber große Werte von m bei Verwendung scharfkantiger Mündungen. —

Der *Ausfluß von Luft* aus einem Rohr mit vorgesetztem Staurand unter Entnahme des Druckes nach Fig. 115 oder 118 und Messung mittels Wasser- oder anderen Manometers unterscheidet sich von dem des Wassers grundsätzlich dadurch, daß der Ausfluß in einen Raum stattfindet, der mit einem Mittel etwa gleicher Dichte erfüllt ist. Der austretende Strom kann also durch das ruhende Medium merklich beeinflußt werden — während der Einfluß beim Ausfluß von Wasser in Luft zweifellos zu vernachlässigen war; der Ausfluß von Wasser durch eine untergetauchte Öffnung wäre das Analogon. Da aber hier merklich abweichende Ausflußziffern für Wasser gelten (nach Weisbach μ um 0,01 kleiner als beim Ausfluß in Luft), so ist es auch für Luft nicht unwahrscheinlich, daß andere Vorzahlen gelten. Physikalisch ist der Unterschied der, daß der in Luft tretende Wasserstrahl seinen Zusammenhang behält, während an dem in Luft austretenden Luftstrahl, wenn man ihm Rauchfäden beimischt, zu sehen ist, wie seitlich allmählich eine Abbröckelung der Luftfäden und eine Auflösung des Strahls erfolgt. Diese Erscheinung wird schon vor dem kontrahierten Querschnitt beginnen und daher bei scharfkantiger Mündung den Ausflußvorgang beeinflussen. Bei Verwendung von Düsen dagegen ist weniger Grund einzusehen für eine Störung des Ausflußvorganges durch das Medium, in das hinein er stattfindet.

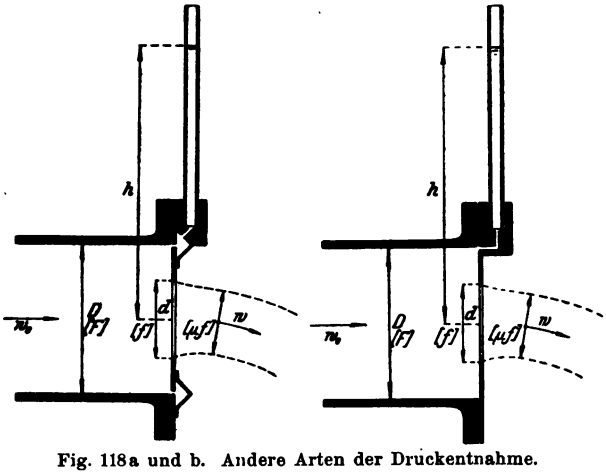


Fig. 118a und b. Andere Arten der Druckentnahme.

Immerhin ist auch für Luft zu setzen:

$$V = kf\sqrt{2g \cdot \frac{p}{\gamma}} = KF\sqrt{2g \cdot \frac{p}{\gamma}} \quad \ldots \text{(4a), (4c)}$$

dabei für scharfkantige Mündungen:

$$k = \frac{\mu m}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}}; \quad K = \frac{\mu m^2}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \quad \ldots \quad (7), (7b)$$

und für abgerundete Düsen

$$k = \frac{m}{\sqrt{1-m^2}}; \quad K = \frac{m^2}{\sqrt{1-m^2}} \quad \ldots \quad (7a), (7c)$$

Beziehungsweise es wären für scharfkantige Mündungen Werte von k versuchsweise festzustellen und daraus ließe sich nach den Formeln berechnen, wie sich die Unvollkommenheit der Kontraktion mit wachsendem Öffnungsverhältnis m steigert.

Letzteren Weg hat A. O. Müller beschritten, und die Werte von μ festgestellt, die in Fig. 116 schon neben denen für Luft gegeben wurden. Die Werte stimmen mit denen für Wasser so gut überein, daß man sie wird übernehmen dürfen, obwohl sie nur durch recht wenige Versuchspunkte belegt sind. Der etwas niedrigere Verlauf der Kurve für Luft gegen die für Wasser erklärt sich — so wie der Wert 0,60 gegen 0,615 für den Ausfluß ohne Vorgeschwindigkeit — daraus, daß bei Luft in erwähnter Weise das Abbröckeln des Strahls schon vor dem kontrahierten Querschnitt beginnt — das aber kommt auf Mitreißen benachbarter Luftteilchen, also auf Energieverbrauch und daher Verminderung der Ausflußmenge, heraus; auch für den Ausfluß von Wasser in Wasser gibt Weisbach die Ausflußzahl um 0,01 kleiner an als für den in Luft hinein erfolgenden Ausfluß, offenbar sind hier die gleichen Gründe vorhanden.

Die für Luft nach Fig. 116 und nach Formel (7) und (7b) zu errechnenden Werte für scharfkantige Mündungen sind in Fig. 117 bereits mit eingetragen. Bei abgerundeter Düse wären die gleichen mit $\mu = 1$ berechneten Werte wie für Wasser zu benutzen (Fig. 117), allerdings liegen positive Versuchszahlen über die Genauigkeit dieser theoretisch zu erwartenden Ausflußziffern nicht vor. Sie werden, wegen der Abnahme von γ bei Luft, eher etwas reichlich sein.

Über die Entnahme des Druckes ist grundsätzlich das gleiche zu sagen wie bei Wasser. Die Entnahme auf dem Stauflansch, nötigenfalls unter Ausgleich der Angabe mehrerer Entnahmestellen in einem Ringwulst, ist die bestdefinierte Art der Entnahme. Die Müllerschen Zahlen Fig. 116 allerdings beziehen sich auf Entnahme an der Rohrwand, in einer Entfernung D vor der Mündung. Zur Vermeidung von merklichen Reibungsverlusten zwischen Entnahmestelle und Staurand sowie zur Vermeidung von Wirbelungseinflüssen an der Entnahmestelle sollte man die Anordnung nicht für $m > 0{,}5$ benutzen, von wo an die besseren sogleich zu gebenden Zahlen vorhanden sind.

61. Durchflußöffnungen an Rohrleitungen. Wenn sich an den Stauflansch eine Rohrleitung anschließt, so werden grundsätzlich verschiedene Verhältnisse für Luft und für Wasser nicht bestehen, insofern als dann jedes der Medien in einen vom gleichen Medium erfüllten Raum strömt. Unsicher bleibt aber diesmal, wie weit sich die Geschwindigkeit w

im kleinsten Strahlquerschnitt hinter demselben wieder in Druck umsetzt, so daß es bei der Messung nicht gleichgültig wäre, ob man den Druck p_2 im Strahlquerschnitt entnimmt, wo der größte Druckabfall $p_1 - p_2$ gemessen würde, oder ob man den Druck p_2 da mißt, wo der Druck durch Umsetzung in Geschwindigkeit um das zugenommen hat, was nicht durch den Stoß des mit der Geschwindigkeit w gehenden Strahles auf die nur mit w_0 strömende Luftsäule im Rohr verloren geht; bei letzterer Art der Messung fiele die Ausflußziffer größer aus als bei ersterer. Die Frage ist allerdings lediglich eine Frage der Vorzahlen, da das quadratische Gesetz nach der jetzt zu gebenden Ableitung theoretisch in beiden Fällen gilt.

Das Folgende gilt auch für das Venturirohr, von dem in § 63 die Rede sein wird; bei ihm findet die Messung von p_2 immer im engsten Querschnitt statt. Die darauf folgende Erweiterung dient dann nur noch der Verminderung des Energieverlustes; wie weit man den Verlust vermindert, ist meßtechnisch nicht unmittelbar wichtig.

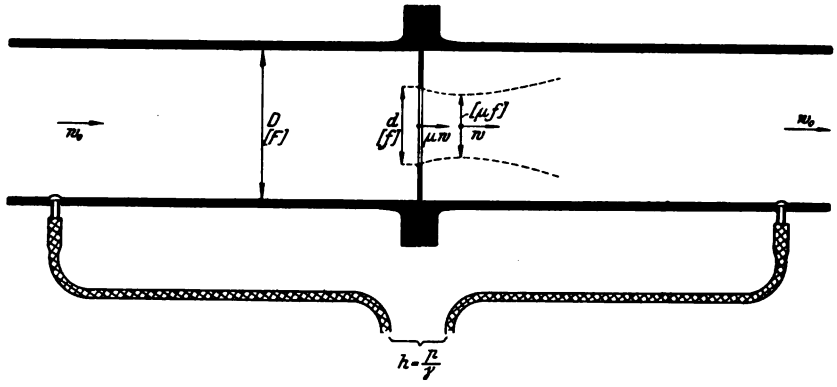


Fig. 119. Stauflansch in einer Rohrleitung.

Für den Stauflansch in einer Rohrleitung aber, sei er nun mit scharfkantiger Mündung (Fig. 119) oder mit abgerundeter Düse versehen, gilt folgende Überlegung — wenn man nämlich annimmt, daß der Wiedergewinn des Druckes bis auf den Carnotschen Stoßverlust erfolgt, der nach Grundsätzen der Mechanik mit $\frac{(w-w_0)^2}{2g}$ m FlS in Ansatz zu bringen ist. Wenn wir mit p' den (statischen) Druck in der Einschnürung des Strahles bezeichnen, so gilt für den Beschleunigungsvorgang bis zum engsten Querschnitt:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_0^2}{2g} = \frac{p'}{\gamma} + \frac{w^2}{2g},$$

und für die Verzögerung bis zur Erreichung einer gleichmäßigen Strömung gilt:

$$\frac{p'}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_0^2}{2g} + \frac{(w-w_0)^2}{2g},$$

indem nämlich hier der gesamte Energieinhalt in beiden Querschnitten um den Stoßverlust verschieden sein muß.

Für den Gesamtvorgang aber gilt:

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{w_0^2}{2g}=\frac{p_2}{\gamma}+\frac{w_0^2}{2g}+\frac{(w-w_0)^2}{2g},$$

$$\frac{p_1-p_2}{\gamma}=\frac{p}{\gamma}=\frac{(w-w_0)^2}{2g}.$$

In bezug auf den Gesamtvorgang findet eine Beschleunigung überhaupt nicht statt, der Druckabfall hat nur den Stoßverlust zu decken.

Wieder ist $w_0=\frac{w}{\mu m}$, worin μ die von m abhängige Kontraktionszahl nach Fig. 116.

Damit wird:

$$\frac{p}{\gamma}=\left(\frac{1}{\mu m}-1\right)^2\cdot\frac{w^2}{2g}.$$

Wieder setzen wir die Beizahl

$$\left(\frac{1}{\mu m}-1\right)^2=\frac{1}{k^2}.$$

Daraus folgt für die einfache Mündung

$$k=\frac{\mu m}{1-\mu m};\quad K=\frac{\mu m^2}{1-\mu m}\quad\ldots\ldots\quad(8),\ (8b)$$

für die Düse mit $\mu=1$:

$$k=\frac{m}{1-m};\quad K=\frac{m^2}{1-m}\quad\ldots\ldots\quad(8a),\ (8c)$$

und wir haben damit die diesmal gültigen Vorzahlen der Formeln

$$w=k\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}},$$

$$V=kf\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}}=KF\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}}\quad\ldots\ldots\quad(4a),\ (4c)$$

Wird also der Druckabfall bis allein auf den Stoßverlust wiedergewonnen, so gilt das quadratische Gesetz ebenso, wie wenn man einen Wiedergewinn von Druck ganz leugnet. Mit letzterer Annahme würde für den Drosselflansch in der glatten Leitung die gleiche Vorzahl nach Formel (7) und (7 b) gelten wie für den Ausfluß aus einer Leitung, Fig. 117.

Die Wahrheit wird sein, daß ein Wiedergewinn an Druck zwar vorhanden, aber viel geringer ist, als der Einführung nur des Carnotschen Stoßverlustes entspricht. Hierfür spricht ein bei Fig. 123 zu erwähnender Widerspruch in den Versuchsunterlagen.

Es liegen für *scharfkantige Mündung in glatter Rohrleitung* ganz neue ausführliche und offenbar sorgfältig durchgeführte Versuche von Brandis vor, auf dessen Arbeit schon oben Bezug genommen wurde.

Bei denselben wird der Druck beiderseits auf dem Staurand entnommen, entsprechend Fig. 118. Die Versuche sind unter vorheriger durch Vorversuche belegter Diskussion der Fehlerquellen ausgeführt, und die Ergebnisse in Formeln und Tabellen zusammengefaßt. Es bleibt zu wünschen, daß ähnliche Versuchsreihen für die anderen meßtechnisch wichtigen Anordnungen, auch für Düsen, ausgeführt werden. Von Brandis konnten natürlich nur die Ausflußzahlen k direkt beobachtet werden, und es konnte dann versucht werden, ob man für die nach Formel (8) oder (8a) zu errechnende Kontraktionszahl μ einen glaublichen Verlauf erhielt — etwa ähnlich dem in Fig. 116.

Diese Rückführung auf die Kontraktion war nach Brandis nicht möglich. Daher war auch kein Anhalt dafür zu gewinnen, ob und wie der Stoßverlust einzuführen sei. Eine rein empirische Wiedergabe der Versuchsergebnisse liegt in folgenden Angaben.

Für die Beziehung $V = (p_1 - p_2)^n$ zwischen Volumen und Druckverlust erwies sich n als etwas kleiner als 0,5, insbesondere wenn der Rand nicht sehr gut scharf, d. h. wenn seine Kantendicke $\delta > \frac{1}{100} d$ war. Um das Rechnen mit gebrochenen Exponenten zu vermeiden, wurde eine Beziehung $V = c + k\,(p_1 - p_2)^{\frac{1}{2}}$ näherungsweise substituiert. Man setze also die Geschwindigkeit bezogen auf den Mündungsdurchmesser:

$$w' = c' + k\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

also das ausfließende Volumen

$$V = c + kf\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}} = c + KF\sqrt{2g\frac{p}{\gamma}} \quad \ldots\ldots \quad (9a)$$

oder, unter Einbeziehung von $\sqrt{2g}$ in die Vorzahl

$$V = c + k'f\sqrt{\frac{p}{\gamma}} = c + K'F\sqrt{\frac{p}{\gamma}} \quad \ldots\ldots \quad (9b)$$

worin wir k und K, k' und K' als *Ausflußziffern* und c als *Berichtigungsziffer* bezeichnen wollen. Es ist dann zu setzen:

$$k = e \cdot \frac{0{,}230}{\sqrt{(1 - m^\varepsilon)}}, \text{ darin } \varepsilon = 1{,}17 + \frac{D^2}{0{,}36} \text{ und } e = 2{,}718.$$

$$k' = 4{,}43 \cdot k; \quad K' = 4{,}43 \cdot K.$$

Die hieraus zu errechnenden, von m und D abhängigen Vorzahlen sind nebst den Berichtigungszahlen in umstehender Tabelle I zusammengestellt.

Die Versuche erstrecken sich auf Rohrdurchmesser von 100 bis 800 mm; das wird für die meisten Zwecke der Praxis ausreichen. Die Öffnungsverhältnisse von 0,5 bis 0,8 werden mit Rücksicht auf tunlichst kleinen Druckverlust für Meßzwecke auch meist bevorzugt werden. Über die Anordnung der Meßvorrichtung wäre unter Bezugnahme auf alles schon Gesagte nur noch festzustellen, daß folgende *Bedingungen* erfüllt

werden sollten: Die Drucke sind auf der Scheibe in der Ecke gegen die Rohrwand zu entnehmen; für unregelmäßige Strömung kann zum Ausgleichen des Druckes in einer Sammelkammer die Konstruktion Fig. 120 verwendet werden, die allerdings besondere Flanschform voraussetzt. Vor dem Staurand sind $8\,D$ hinter einer Querschnittsänderung und $4\,D$ hinter einer Krümmung des Rohres freizuhalten. Hinter dem Staurand sollten Richtungsänderungen und Verengungen des Querschnitts frühestens im Abstand $3\,D$, Erweiterungen frühestens im Abstand $6\,D$ vorkommen. Der Staurand soll nicht mehr als $\delta = 0{,}01\,d$ Randdicke haben, da sonst die Kontraktion unvollkommener wird. Dann spielt übrigens bei Geschwindigkeiten über 5 m/sek die Berichtigungszahl c keine wesentliche Rolle. —

Tab. I. Durchflußziffern k, K, K'

$f/F = m$ $d/D = \sqrt{m}$	$f\,F = m = 0{,}5$			
D	k	K	K'	c
0,10	0,730	0,365	0,01273	0,0004
0,15	0,730	0,365	0,0286	0,0009
0,20	0,724	0,362	0,0504	0,0014
0,25	0,720	0,360	0,0782	0,0022
0,30	0,712	0,356	0,1115	0,0028
0.35	0,705	0,353	0,1505	0,0038
0,40	0,697	0,349	0,1945	0,0044
0,45	0,690	0,345	0,243	0,0056
0,50	0,686	0,343	0,298	0,0069
0,55	0,677	0,338	0,357	0,0072
0,60	0,671	0,336	0,422	0,0085
0,70	0,656	0,329	0,562	0,0115
0,80	0,645	0,323	0,718	0,0125

Versuche über die Durchflußzahlen an scharfkantigen Mündungen in glatter Rohrleitung hat auch A. O. Müller gemacht. Die Versuche führen zu dem Ergebnis, es sei nach der oben gegebenen Ableitung nur der Stoßverlust vom Druckabfall zu decken, so daß für die Ausflußzahlen

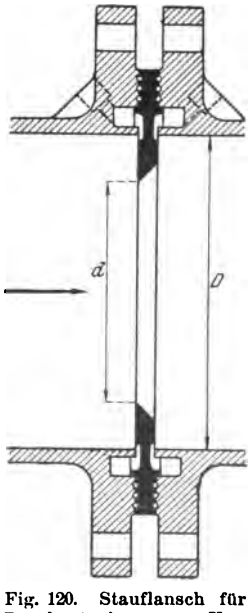


Fig. 120. Stauflansch für Druckentnahme am Umfang nach Brandis.

bei scharfer Mündung:

$$k = \frac{\mu\, m}{1 - \mu\, m}\,; \qquad K = \frac{\mu\, m^2}{1 - \mu\, m}. \quad . \quad (8),\ (8b)$$

bei abgerundeter Düse:

$$k = \frac{m}{1 - m}\,; \qquad K = \frac{m^2}{1 - m}. \quad . \quad . \quad (8a),\ (8c)$$

zu setzen wäre. μ habe dabei die gleichen Werte, wie für den Ausfluß aus einer Rohrleitung in Fig. 116 gegeben.

Letzteres ist wohl glaublich; aber die nach diesen Angaben zu berechnenden Zahlen, die Fig. 122 absichtlich in kleinem Maßstab gibt, weichen weiter von den Brandisschen Werten ab, als allein wegen der verschiedenen Art der Druckentnahme zulässig erscheint. Fig. 123 gibt zum Vergleich die Werte von Müller für Ausfluß aus (b) und für Durchfluß in (a) einer Rohrleitung neben den Brandisschen Werten. Befriedigender Anschluß ergibt sich zwischen den Brandisschen Werten und denjenigen der Fig. 117, die nach Formel (7) und (7 a) unter

und Berichtigungsziffern c für Luft, nach Brandis. Formel 9, 9a, 9b.

$f/F = m = 0{,}6$				$f/F = m = 0{,}7$				$f/F = m = 0{,}8$			
k	K	K'	c	k	K	K'	c	k	K	K'	c
0,784	0,470	0,01633	0,0005	0,854	0,599	0,0208	0,0007	0,981	0,785	0,0273	0,0008
0,778	0,466	0,0366	0,0011	0,848	0,594	0,0466	0,0015	0,971	0,776	0,0608	0,0018
0,770	0,462	0,0643	0,0019	0,840	0,589	0,0819	0,0024	0,961	0,767	0,1068	0,0030
0,766	0,460	0,1000	0,0030	0,831	0,582	0,1264	0,0038	0,949	0,757	0,1650	0,0047
0,755	0,454	0,1420	0,0038	0,820	0,573	0,1800	0,0050	0,930	0,742	0,233	0,0062
0,745	0,447	0,1910	0,0052	0,804	0,563	0,240	0,0067	0,912	0,728	0,311	0,0085
0,737	0,442	0,246	0,0060	0,789	0,552	0,308	0,0080	0,895	0,715	0,398	0,0101
0,723	0,434	0,306	0,0076	0,778	0,545	0,384	0,0100	0,876	0,700	0,493	0,0130
0,714	0,428	0,373	0,0094	0,767	0,537	0,467	0,0120	0,856	0,684	0,596	0,0160
0.707	0,425	0,448	0,0100	0,754	0,528	0,557	0,0130	0,837	0,671	0,708	0,0170
0.697	0,419	0,525	0,0120	0,745	0,522	0,654	0,0160	0,821	0,656	0,823	0,0200
0,682	0,409	0,698	0,0160	0,722	0,505	0,862	0,0215	0,786	0,629	1,071	0,0280
0.666	0,399	0,890	0,0215	0,703	0,492	1,092	0,0280	0,750	0,600	1,335	0,0320

der Annahme berechnet sind, ein Druckwiedergewinn finde gar nicht statt — Stoßverlust 100%.

Diese Annahme scheint also doch die besser zutreffende zu sein, und danach wird man die Durchflußmengen bei Düsen und Mündungen, an die ein Rohr anschließt, nicht nach Formel (8) bis (8c), sondern nach Formel (7) bis (7 c) und demnach unter Benutzung der Kurventafeln Fig. 117 berechnen.

Dafür spricht auch das Ergebnis noch unveröffentlichter *Versuche der Kommission für die Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren*, die im Prüffeld der Siemens-Schuckert-Werke ausgeführt wurden und die ich durch freundliches Entgegenkommen zu benutzen in der Lage bin. Die Versuche führten die gleiche Luftmenge durch jedesmal mehrere Meßvorrichtungen, so daß ein Vergleich möglich war, wenn auch keine derselben — Düsen, Stauräder, Thomasmesser, Anemometer, Staurohr — als absolut gültig angesehen werden konnte. Alle Angaben wurden aber mit denen einer bestimmten „Kontrolldüse" verglichen. Es zeigte sich, daß alle Düsenmessungen so zuverlässig waren, wie es die Versuchsart

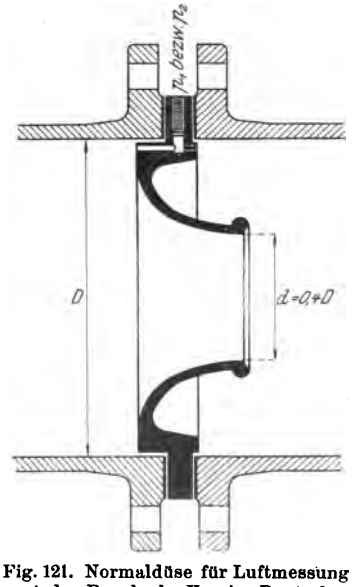


Fig. 121. Normaldüse für Luftmessung nach den Regeln des Vereins Deutscher Ingenieure für Ventilatorprüfungen. Schaeffer & Budenberg.

nur irgend erwarten ließ, und zwar bestimmte man dabei die Luftmengen nach Formel (7) bis (7 c). Beispielsweise ergaben sich gegen die mit einem Thomasmesser abzulesenden Mengen Unterschiede von 2,5% im Mittel — welcher von beiden Meßeinrichtungen dieser Unterschied zur Last zu legen ist, bleibt an sich unentschieden, doch ist durch die immerhin gute Übereinstimmung wahrscheinlich gemacht, daß für viele Zwecke jede der beiden Einrichtungen genügt. Man wird daher die Düse ohne besondere Eichung anwenden dürfen, wo 2,5% Genauigkeit ausreicht, und wo man nicht einen Staurand genau nach den Angaben von Brandis benutzen kann.

Die Frage, ob eine *Düse oder Mündung* verwendet werden soll, entscheidet sich übrigens oft schon einfach dadurch, daß Düsen nicht

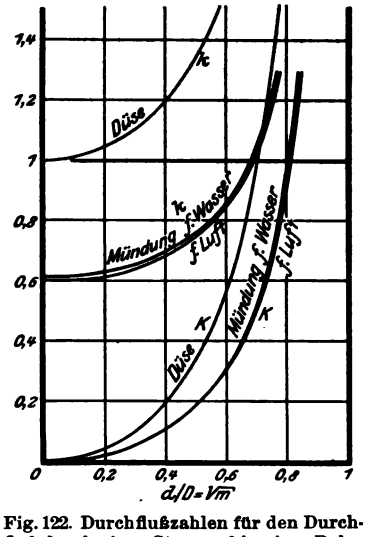


Fig. 122. Durchflußzahlen für den Durchfluß durch einen Staurand in einer Rohrleitung.

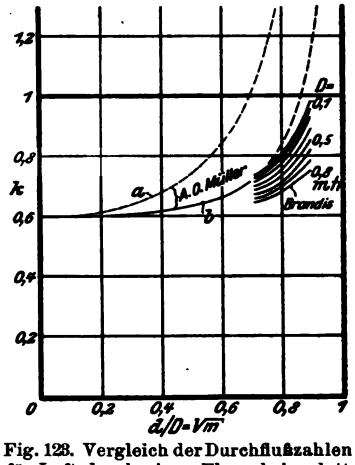


Fig. 123. Vergleich der Durchflußzahlen k für Luft durch einen Flansch in glatter Rohrleitung, nach Brandis (Tabelle I) mit den Zahlen von A. O. Müller und zwar a) Berechnung nach Formel (8), vgl. Fig. 122; b) Berechnung nach Formel (7), vgl. Fig. 117.

wohl für sehr große Durchmesserverhältnisse hergestellt werden können. Die *Normaldüse* Fig. 121 hat das Verhältnis $d : D = 0{,}4$, also $m = 0{,}16$, während die Brandisschen Angaben erst bei $m = 0{,}5$ beginnen. Wo also größere Spannungsverluste unzulässig sind, muß man die Mündung (oder ein Venturirohr, § 63) verwenden.

Im übrigen sind die letztgenannten Angaben die in solchem Maße vollständigsten, daß es sich empfehlen wird, tunlichst die von ihnen verlangten Meßanordnungen anzuwenden und sich dann der Tabelle I zu bedienen.

Oft wird man aber die Düse vorziehen, obwohl positive Eichergebnisse mit ihr nicht vorliegen, und zwar deshalb, weil ihre *Empfindlichkeit für Störungen* geringer ist. Das zeigen die gleichen Versuche der genannten Kommission, bei denen auch Störungen in die Leitung ein-

gebaut wurden. Als solche wurden ca. 3 m vor die Meßvorrichtung in die 500 m weite Leitung eingebaut (also im Abstand 6 *D*):

a) ein diametraler Steg,
b) eine halbkreisförmige Abblendung,
c) eine Drosselscheibe mit Loch.

Wenn nun die an der fraglichen Meßstelle bei fehlender Störung abgelesenen Luftmengen jedesmal mit 100 bezeichnet werden (Spalte 1), so wurden bei vorhandener Störung folgende Werte dort gemessen, obwohl die Kontrolldüse unveränderten Luftstrom nachwies:

Nr.	1	2	3	4	5	6
Störung	—	a	b	c	Mittelwert 2 bis 4	Mittlere Abweichung bei Störungen, 5 minus 1
Düse 200 Ø	100	100	99	99,5	99,5	— 0,5%
Staurand 250 Ø	100	102	106	108	105,3	+ 5,3%
300 Ø	100	104	110	102	105,3	+ 5,3%
350 Ø	100	105	124	103	110,7	+10,7%
400 Ø	100	109	120	109	112,7	+12,7%

Die Düse 200 mm Ø und der Staurand 250 mm Ø sind, unter Berücksichtigung der Kontraktion bei letzterem, etwa gleichwertig in bezug auf Druckverlust bei bestimmter Luftmenge. Dann aber sieht man, daß der Staurand große Fehler ergibt, wenn der Luftstrom in gestörtem Zustande auf ihn trifft; die Fehler bei der Düse sind so gering, daß sie nach der Meßmethode auch wohl dieser zur Last gelegt werden könnten. Die Falschanzeigen eines Staurandes sind immer Mehranzeigen Die Falschanzeige infolge von Unordnung nimmt aber auch zu mit steigendem Öffnungsverhältnis des Staurandes.

Es bleibt eine offene Frage, ob bei größerem Öffnungsverhältnis auch die Düse merklich durch Unregelmäßigkeiten des Luftstroms beeinflußt wird. Gerade die großen Öffnungsverhältnisse aber sind die praktisch wichtigsten. Zu bemerken bleibt allerdings noch, daß bei diesen Versuchen der Druck nur an einer Stelle entnommen wurde, so daß ein Ausgleich wie bei dem Staurand mit Sammelring (entsprechend Fig. 120) nicht erfolgte und also systematische Zufälligkeiten wohl denkbar sind. Im ganzen wird man vermuten dürfen, daß die Düse für Störungen weniger empfindlich ist, weil sie den Strahl zwangsweise führt — allerdings nur dann, wenn sie durchaus genügend schlank abgerundet ist.

62. Einströmung in eine Leitung. Ein Fall, den man meßtechnisch oft gerne verwirklichen würde, ist der, wo an den Eingang einer Leitung, etwa der Saugleitung eines Kompressors, eine Mündung oder eine Düse gesetzt wird.

Rechnerisch kann man dem Fall gerecht zu werden suchen, indem man die Kontraktion als vollkommen ansieht und hinter dem Drosselflansch den Carnotschen Stoßverlust ansetzt. Eine Vorgeschwindigkeit

fehlt. Das führt durch eine ganz ähnliche Ableitung auf Einströmungsziffern

$$k = \frac{1}{\sqrt{m^2 + \left(\frac{1}{\mu} - m\right)^2}}; \quad K = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\mu m} - 1\right)^2}}, \quad \text{. (10), (10b)}$$

in denen man $\mu = 0{,}60$ für Luft, $\mu = 0{,}615$ für Wasser bei scharfkantiger Mündung einsetzt. Bei abgerundeter Düse aber wäre mit $\mu \backsim 1$ zu setzen

$$k = \frac{1}{\sqrt{2m^2 - 2m + 1}}; \quad K = \frac{m}{\sqrt{2m^2 - 2m + 1}}. \quad \text{. (10a), (10c)}$$

Die Werte der Formeln, zu verwenden in Verbindung mit Formel (9) bis (9b), S. 155, sind in Fig. 124 wiedergegeben.

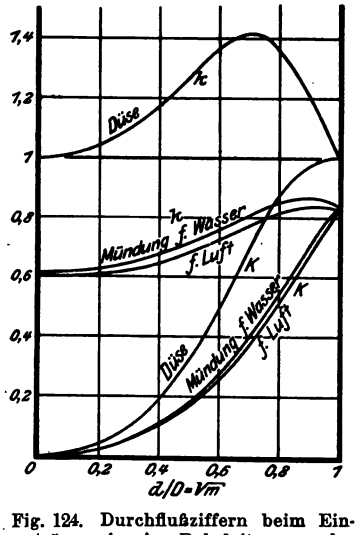


Fig. 124. Durchflußziffern beim Einströmen in eine Rohrleitung, nach A. O. Müller.

Die Figur wird wieder klein gegeben, weil zur Anwendung auch dieser Zahlen nicht geraten werden kann. Die Unsicherheit wegen des Stoßverlustes ist dieselbe wie bei der Durchflußöffnung, und die Entscheidung hätte vermutlich auch hier anders auszufallen, als die Formeln (8) bis (8c) annehmen. Außerdem werden kleine Mündungen wohl vollkommene Kontraktion aufweisen, aber bei der allmählichen Vergrößerung des Öffnungsverhältnisses bis auf Eins fällt auch die Kontraktion nahezu fort, es wird $\mu \backsim 1$, wie Rauchfäden in Luft erkennen lassen; man braucht nur eine Zigarette an das Einsaugrohr eines Ventilators zu halten. Andere Versuche als die von A. O. Müller liegen aber nicht vor.

Bei Verwendung von Düsen machen die auf S. 159 besprochenen Versuche es wahrscheinlich, daß man einfach so rechnen kann, als wenn die Düse in einen großen Raum mündete; man setze also $k = 1$.

63. Venturirohr. Bei der Verwendung einfacher Öffnungen geht die auf die Beschleunigung verwendete, dem gemessenen Druckabfall entsprechende Energie verloren — auch dann, wenn ein Rohr sich hinter der Mündung anschließt. Will man nicht große Energieverluste in den Kauf nehmen, so muß man sich mit kleinen Spannungsabfällen begnügen, die unbequem zu messen und namentlich nicht gut zu registrieren oder zu integrieren sind.

Beim Venturirohr wird hinter die Einschnürung eine schlank konische Erweiterung gelegt, in der der Spannungsabfall wieder eingebracht wird bis auf einen den Reibungsverlusten entsprechenden Bruchteil.

Venturirohre werden in Amerika seit Jahren, bei uns seit kurzem zum Messen der Wasserlieferung von Wasserwerken (als Hauptmesser) verwendet. In Fig. 125 hat die Einschnürung ein Viertel des Rohrquerschnittes. Die Verjüngung vor derselben ist nicht zu plötzlich, um eine gleichmäßige Verteilung des Druckes im verjüngten Querschnitt zu erzielen. Zu gleichem Zweck ist der Übergang in der Verjüngung gut abgerundet. Die Erweiterung, linear im Verhältnis 1 zu 10, hat etwa den Wert wie bei Turbinendüsen. Vor Beginn und in der Verjüngung wird der Druck in einem Ringraum entnommen; die Differenz kann zur Messung gebracht werden und ist ein Maß für die derzeitige Wasserlieferung des Werkes.

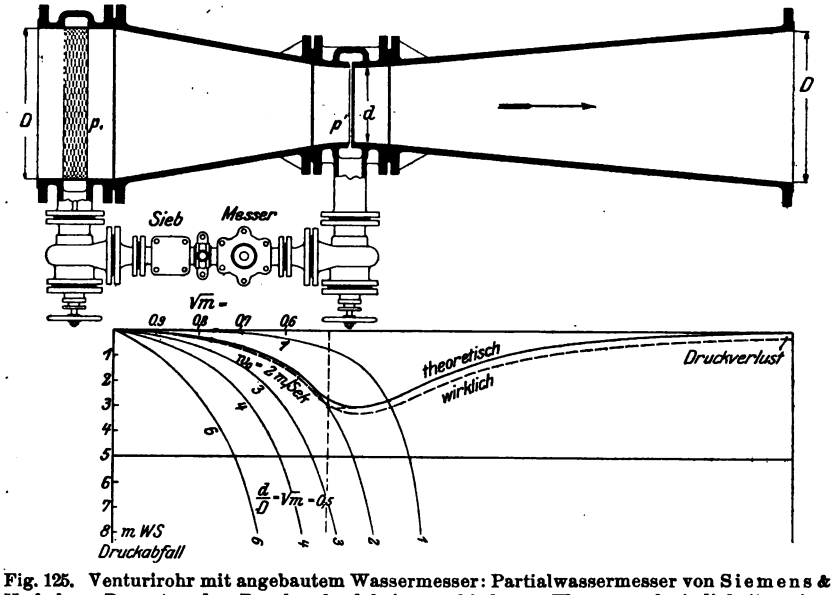


Fig. 125. Venturirohr mit angebautem Wassermesser: Partialwassermesser von Siemens & Halske. Darunter der Druckverlauf bei verschiedenen Wassergeschwindigkeiten, insbesondere bei 2 m/sek.

Der Druckabfall $p_1 - p'$ zwischen den Meßstellen wird zur Erhöhung der Wassergeschwindigkeit w_0 im glatten Rohr auf diejenige w in der Einschnürung verwendet. Es gilt

$$\frac{p_1 - p'}{\gamma} = \frac{w^2}{2g} - \frac{w_0^2}{2g},$$

und mit $w = \frac{w_0}{m}$, unter m das Querschnittsverhältnis verstanden, wird wie auf S. 147

$$\frac{p_1 - p'}{\gamma} = \left(\frac{1}{m^2} - 1\right)\frac{w_0^2}{2g}.$$

Das durch ein Venturirohr gehende Volumen wird

$$V = F \cdot w_0 = \zeta \cdot \frac{m^2}{1 - m^2} \cdot \sqrt{\frac{2g(p_1 - p')}{\gamma}}, \quad \ldots \quad (11)$$

worin $\zeta \gtrsim 1$ die Reibung berücksichtigt. Alles ist in Metern, der Druck in kg/qm zu messen.

Da für den kreisrunden Querschnitt zugleich $m = \frac{d^2}{D^2}$ ist, so wird auch (mit $\zeta = 1$)

$$\frac{p_1 - p'}{\gamma} = \left(\frac{D^4}{d^4} - 1\right)\frac{w_0^2}{2g}. \quad \ldots\ldots (11a)$$

Der Druckabfall ändert sich also bei einem bestimmten Rohr mit dem Quadrat der Geschwindigkeit oder der durchgehenden Menge, außerdem für verschiedene Rohre mit der um Eins verminderten vierten Potenz des Durchmesserverhältnisses. Letztere Beziehung gilt nicht nur für den gesamten Druckverlust bis zur Einschnürung, sondern auch für die Druckänderung in axialer Richtung. Für den Druck ergibt sich der in Fig. 125 unten abgebildete Verlauf, der im sich verjüngenden Teil für mehrere Wassergeschwindigkeiten, im sich erweiternden für die Wassergeschwindigkeit $w_0 = 2$ m/sek gegeben ist. Die ausgezogene theoretisch ermittelte Kurve wird um den Betrag der Reibungsverluste unterschritten werden, etwa so, wie die gestrichelte es andeutet. Da auch die Reibungsverluste etwa dem Quadrat der Wassermenge proportional gehen so wird das quadratische Gesetz insgesamt auch durch sie nicht gestört. Nur sind sie empirisch zu berücksichtigen bei der Messung und bewirken, daß insgesamt ein Druckverlust in der ganzen Anordnung entsteht, der etwa 10—20% des zu messenden Spannungsabfalles ausmacht und immerhin der hohen Geschwindigkeiten wegen merklich größer ist als in einer gleichen Strecke glatten Rohres.

Zur *Anzeige* des Druckabfalles und damit *des augenblicklichen Wasserdurchganges* dient jedes beliebige Quecksilbermanometer.

Um die durchgegangene Wassermenge zu *integrieren*, dienten vielfach umständliche Getriebe, die die Druckabfälle zeitlich auswerteten. Neuerdings verwendet man als einfachstes Mittel einen Wassermesser dazu: einen solchen Typ nämlich, für den sich der Wasserdurchgang quadratisch mit dem Druckverlust verändert. Beim *Partialwassermesser* wird dann stets ein bestimmter Bruchteil des gesamten Wasserdurchganges in den Messer gehen, der gleich für die Gesamtmenge geteilt sein kann. Das Ringsieb an der ersten Entnahmestelle (Fig. 125) ist nur beim Partialmesser nötig, nicht für den Anbau eines Quecksilbermanometers. Wesentlich ist, daß das Verhältnis der Durchflußmengen dauernd unverändert bleibt; namentlich durch Inkrustationen kann es gestört werden. —

Das Venturirohr ist auch zur Messung von *Luft- und Gasmengen* benutzt worden. Der Zweck ist der gleiche, nämlich Druckunterschiede von bequem meßbarer Größenordnung zu erhalten bei doch nur geringem bleibenden Druckverlust. So hat man[1]) in Lüftungsanlagen einfach einen rechteckigen Kanal passend schlank eingeschnürt; die zu messende Druckdifferenz kann fast gleich dem vom Ventilator erzeugten statischen Druck werden; die Berechnung ist die gleiche wie für

[1]) Dietz, Gesundheitsingenieur 1913, S. 871.

Wasser; die Erweiterungen hinter der Einschnürung sind genügend schlank zu gestalten. Mit den übrigen durchweg unsicheren Methoden zur Messung größerer Luftmengen kann diese ohne weiteres konkurrieren, auch wenn man die Reibungsverluste schätzen muß. Wesentlich ist es, daß alle Übergänge schlank gemacht werden und daß auch die Einschnürung nicht zu plötzlich erfolgt; denn es müssen Ablösungserscheinungen und Energieverluste durch Turbulenz vermieden werden, wenn Gleichung (11) angewandt werden soll. — Der Einbau eines Anemometers oder eines Gasometers als Partialmesser würde auch möglich sein.

Zur Messung von *Hochdruckdampf* und von *Preßluft* fand Verfasser das Venturirohr schon 1903 in Amerika gelegentlich benutzt. Man berechnete die Mengen unter Zugrundelegung adiabatischer Zustandsänderung — worauf einzugehen hier zu weit führen würde.

b) Zähler für dauernde Mengenmessung.

64. Übersicht. Die bisher aufgezählten Methoden zur Messung von Stoffmengen — Mengen fester, d. h. zumeist körniger, oder aber flüssiger oder gasförmiger Stoffe — sollten im allgemeinen dem Zweck dienen, bei einmal auszuführenden Versuchen die in der Maschine oder dem Maschinenaggregat umgesetzte Stoffmenge festzustellen. In dem Maß, wie sich die Erkenntnis verbreitet hat, daß nur durch dauernde eingehende Überwachung des Betriebes ein wirtschaftlicher Betrieb zu erzielen sei, war man bestrebt, Einrichtungen zu finden, die die Mengenmessung ohne besondere Aufsicht selbsttätig bewirken und die es dabei gestatten, die insgesamt während der ganzen Arbeitsschicht oder während noch längerer Zeiträume durchgegangenen Stoffmengen ablesen zu lassen. Die Apparate müssen also die jeweils durchgehenden Mengen integrieren. Die Möglichkeit dazu ergibt sich aus der Bauart einzelner Formen von selbst als einfacher Zusammenzählungsprozeß. Bei anderen ist ein mehr oder weniger umständliches Getriebe zur richtigen Addition erforderlich.

Die Apparate sprechen ebenso wie die bisher genannten Meßmethoden entweder auf das *Gewicht* oder auf das *Volumen* an. Nicht immer ist es für Betriebszwecke gleichgültig, welche von beiden Größen angegeben wird. Wünschenswert ist es aber, daß die Meßeinrichtung eindeutig entweder auf das Gewicht oder auf das Volumen anspricht, daß die Angaben demnach *vom spezifischen Gewicht unabhängig* sind. Bei den Messern für Gase und Dämpfe ergibt sich eine Schwierigkeit, indem die meisten Meßeinrichtungen auf das Volumen reagieren, während man fast ebenso regelmäßig das Gewicht kennen will, bzw. das reduzierte Volumen, das einer Gewichtsangabe gleichbedeutend ist (§ 44). Wir werden umständliche Getriebe zur selbsttätigen Bildung des Produktes für das Volumen und spezifische Gewicht kennen lernen (Fig. 146 und 150).

Für den eigentlichen Additionsvorgang dient wohl in jedem Fall ein Zählwerk, welches angibt, wie oft die einer Umdrehung der Zähl-

werkswelle entsprechende Menge durch den Messer gegangen ist. Das Zählwerk hat entweder springende oder gleichmäßig fortschreitende Zahlen, oder es besteht aus einem System von Zeigern, die nacheinander die Einer, Zehner, Hunderter usf. angeben. Die Ablesung erfolgt so, wie wir es von den eigentlichen Zählwerken her kennen (§ 35).

Das eigentliche *Verwendungsgebiet* der Zähler ist der laufende Betrieb. In modernen Kesselhäusern werden Kohlen- und Wassermesser, auch wohl Dampfmesser verwendet. In modernen Maschinenhäusern kommen Dampfmesser, Gasmesser oder Ölmesser zur Verwendung, während andererseits die erzeugte Leistung ebenso fortlaufend durch Arbeitsmesser (siehe hierüber § 96), gegebenenfalls auch durch Wattstundenzähler (in diesem Buch nicht beschrieben) gemessen wird. — Auch für kürzer dauernde Versuche ist die Verwendung der Messer bequem, wenngleich der Anbau gelegentlich umständlich ist. Schwierigkeit bei kurzen Versuchen macht aber oft die Tatsache, daß die Ableseeinrichtung des Zählwerks für kurz dauernde Versuche nicht geeignet ist. Insbesondere Wassermesser werden für die Zwecke städtischer Wasserlieferung gebaut, dann nur monatlich oder noch seltener abgelesen, wobei natürlich die einzelnen Liter keine Rolle mehr spielen, wohl aber eine Anzeige bis in die Millionen hinein dafür sorgen muß, daß nicht durch ein- oder mehrmalige Überschreitung der gesamten Ablesungskapazität die Messung illusorisch wird. Für kurz dauernde Versuche ist dann aber die Ablesung der letzten Ziffer noch nicht genügend genau. Wassermesser und gelegentlich auch Gasuhren wird man deshalb, wenn sie für kurze Versuche dienen sollen, mit einem besonderen Zählwerk versehen lassen, welches für die so viel kürzeren Ablesungsintervalle eine passende Meßgenauigkeit ergibt.

Die Verwendung der selbsttätig integrierenden Messer ist deshalb auch für Versuchszwecke sehr bequem, weil eine große Sicherheit gegen beabsichtigte und unbeabsichtigte Verwirrung der Meßergebnisse besteht. Die Messer befinden sich in einem festen Gehäuse, in zahlreichen Fällen ist ihre Wirksamkeit sogar daran gebunden, daß das Gehäuse geschlossen bleibt. Dabei bietet das gleichmäßige Fortschreiten der Zählwerksangaben ein bequemes Mittel der Kontrolle, die durch Bildung der Meßdifferenzen jederzeit ausgeübt werden kann.

Verhütung beabsichtigter Fälschungen des Meßergebnisses ist auch im regelmäßigen Betriebe sehr wichtig. Wassermesser und Gasuhren werden deshalb plombiert, an selbsttätigen Wagen befinden sich besondere Einrichtungen zur Sicherung gegen Fälschungen, die namentlich da wohl zu erwarten sind, wo die Angaben der Apparate zu Lohnabrechnungen verwendet werden. —

Hinsichtlich der *Bauarten* sind die Mehrzahl der Messer *Motorzähler*, um einen in der Elektrotechnik üblichen Ausdruck zu gebrauchen. Sie stellen kleine Kraftmaschinen dar, deren Umlaufzahl mit der Menge des beaufschlagenden Mediums wächst. Die Motoren können Kolbenmotoren sein, so die Kolbenwassermesser und die trockenen Gasmesser. Andere Messer sind Kreiselradmotoren; bei ihnen wird die Umlaufgeschwindigkeit eines Strahlrades von der beaufschlagenden Menge,

eventuell von dessen Austrittsgeschwindigkeit aus einer Düse abhängen. Hierher gehören die Flügelradwassermesser der Vielstrahl- und der Einstrahltype sowie die Woltmann-Wassermesser. Die gleichen Formen der Flügelradmesser finden wir auch für Luft in neuerer Zeit verwendet, wie es sich denn überhaupt zeigt, daß mehr und mehr die für einen Aggregatzustand passende Messerform auch für andere Aggregatzustände verwendet wird.

Ein anderer weitverbreiteter Typ von Motorzählern sind eigenartige Kapselwerke. Die Kapsel der Kapselmaschine wird hier zur Meßkammer, während das Laufrad zum umlaufenden und daher messenden Teil wird. Hierher gehören die Scheibenwassermesser sowie die Kapselluftmesser, endlich die gewöhnlichen nassen Gasuhren mit Crossley-Trommel.

Die Motorzähler sind dadurch gekennzeichnet, daß sie sich kontinuierlich in Bewegung befinden, solange sie vom zu messenden Medium angetrieben werden, sie werden daher gleichmäßig von dem zu messenden Stoff aufnehmen und abgeben. Diejenigen Messertypen, die wir als *Kippmesser* bezeichnen wollen, arbeiten nicht kontinuierlich, sondern abwechselnd wird eine Kammer gefüllt und durch Umkippen wieder entleert. Solche Messer sind für Flüssigkeiten und für körnige Stoffe in Verwendung, einerseits unter dem Namen der offenen Flüssigkeitsmesser, weil sie nämlich nicht wie die Motormesser unter Druck arbeiten und deshalb nicht in einem Gehäuse eingeschlossen zu sein brauchen, andererseits die auf dem Kipprinzip beruhenden Kohlen- und Getreidewagen.

Eine dritte größere Kategorie von Messern läßt sich noch erkennen in den *Strömungsmessern*. Diese benutzen den Spannungsabfall des (flüssigen, gas- oder dampfförmigen) Mittels zur Messung der augenblicklich durchgehenden Menge und integrieren diese Menge auf irgendeine Weise. Für den Bau von Dampfmessern ist dies Prinzip vorläufig noch das einzige brauchbare. Seine Schwäche ist, daß es eine Registrierung nicht ohne weiteres ergibt, weil es auf die augenblickliche Durchgangsmenge anspricht, nicht aber wie die übrigen Methoden auf den Integralwert. Für Dampfmesser hilft man sich entweder durch Planimetrieren eines aufgezeichneten Diagrammes von Hand, oder durch Einbau von Additionsgetrieben (Fig. 149). Der Venturimesser ist bei uns erst lebensfähig geworden, seitdem man im Einbau eines kleinen parallel geschalteten Partialmessers — eines Wassermessers sonst gewöhnlicher Bauart — ein sehr bequemes Mittel zur Integration gefunden hat.

Eine Reihe von Meßeinrichtungen, die sich im Betriebe bewährt hat, steht außerhalb unseres Schemas. Wir besprechen noch die selbsttätigen Wagen, sowie den Thomasmesser für Gasmengen.

Alle Zähler arbeiten mit einem *Energieverlust*, der zum Betriebe verbrauchten Energie. Bei den Motorzählern wächst der *Druckverlust* im allgemeinen mit dem Quadrat der durchgehenden Menge, ist also zunächst klein, um späterhin rasch beträchtliche Werte anzunehmen. Die Kippmesser arbeiten mit einem Gefälleverlust, dessen Größe von der durchgehenden Menge unabhängig ist. Bei den Strömungsmessern

und bei anderen Typen tritt ein Gefälleverlust nur insoweit auf, wie einfache Reibungswiderstände der strömenden Flüssigkeit im Apparat vorliegen. Bei den Dampfmessern wächst bei einer Type, dem Mündungsmesser, der Druckverlust mit dem Quadrat der Menge, während er bei den Schwimmermessern konstant gehalten wird.

Für die Auswahl der Messer kann der durch sie verursachte Druckverlust sehr in Betracht kommen. Insbesondere empfiehlt es sich um des Energieverlustes willen, bei Motormessern nicht zu kleine, bei Kippmessern nicht zu große Typen zu verwenden.

Neben dem Druckverlust ist noch das *Verhalten* des Messers *bei kleinen Durchflußmengen* für viele Verwendungszwecke wichtig. Nicht für alle, denn beispielsweise im Kesselhausbetriebe kann man es leicht so einrichten, daß der Speisewassermesser niemals mit einer kleineren Durchflußmenge beansprucht wird, als bei der er noch zuverlässig mißt, bei Verwendung selbsttätiger Speisewasserregler pflegt ohnehin

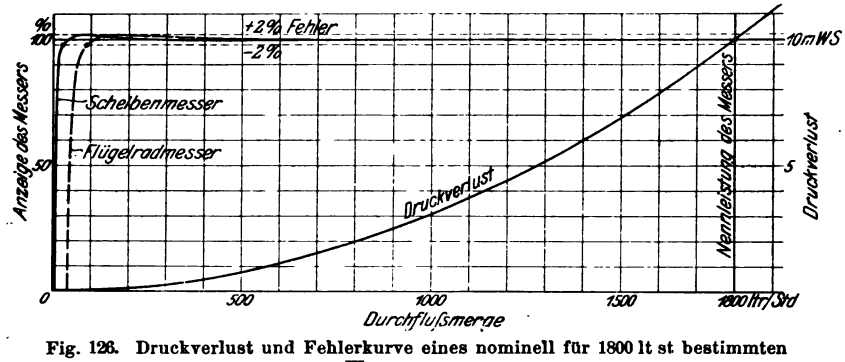


Fig. 126. Druckverlust und Fehlerkurve eines nominell für 1800 lt st bestimmten Wassermessers.

die Speisung immer mit der gleichen sekundlichen Menge zu erfolgen und wird nur nach Bedarf längere oder kürzere Zeit unterbrochen.

Eine Reihe von Messertypen hat die charakteristische Eigenschaft richtig zu messen von der normalen Durchflußmenge bis herab zu einem Durchfluß, der ein gewisser kleiner Prozentsatz derselben ist. In neuem Zustand beginnt die richtige Anzeige bei Flügelradwassermessern bei etwa 2% des normalen Durchflusses, bei Scheibenwassermessern bei etwa 1%. Unterhalb dieser Mindestentnahme hört die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit des Zählwerks und Durchgangsmenge auf, das Zählwerk läuft erheblich langsamer, als es sollte, um bald zum Stillstand zu kommen, wenn die durchgehende Menge sich noch weiter vermindert. Die Grenze, wo der Messer zu zeigen beginnt, heißt seine *Empfindlichkeit*. Die charakteristische Fehlerkurve von Wassermessern zeigt Fig. 126.

Andere Messertypen geben praktisch absolute Genauigkeit auch bei kleinsten Durchflußmengen. So insbesondere die Gasuhren, bei denen der Wasserverschluß jeglichen Gasdurchgang ohne entsprechende Trommeldrehung verhindert.

Wo Wassermesser für *Kesselspeisung* in dauerndem Betrieb dienen, sollen sie an eine Stelle geschaltet werden, wo das Wasser noch kalt ist, also vor einen Vorwärmer. Anders jedoch, wenn man die besonderen, als *Kesselspeisewassermesser* bezeichneten und für Temperaturen bis zu 150° geeigneten Typen verwendet. Bei Injektorspeisung kommt der Messer besser in die Druckleitung, damit er nicht das Schlabberwasser mitmißt. Außerdem unterscheidet sich die Anzeige des Messers beim Einbau vor oder hinter dem Injektor um den Dampfverbrauch des Injektors; dem Vergleich mit einer Dampfspeisepumpe ohne Vorwärmung wird der Einbau vor dem Injektor besser gerecht, weil zwar die vom Injektor verbrauchte Dampfmenge wieder verdampft werden muß, aber die dazu nötige Wärme nicht mehr zugeführt zu werden braucht; es ist in jedem Fall nach dem Zweck der Messung zu verfahren. Offene Wassermesser, die oft für Kesselspeisung verwendet werden, müssen auch in die Saugleitung geschaltet werden und erhalten außerdem zweckmäßig einen Ausgleichbehälter zwischen sich und der Speisepumpe. Geschlossene Wassermesser kommen, abgesehen von Injektorspeisungen, in die Druckleitung, jedoch vor einen etwa vorhandenen Vorwärmer. Für Kesselspeisezwecke werden Kolbenwassermesser den Flügelradwassermessern meist vorgezogen; neuerdings kommen die Scheibenwassermesser sehr in Betracht.

Für Versuchszwecke wird man eine besondere *Eichung* des Messers nicht umgehen können, da alle Messer in der Genauigkeit mäßig sind, wenigstens auf die Dauer. Wo man genaue Ergebnisse erwartet, darf man bei einem Versuch den Messer nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit laufen lassen und muß seine Angabe bei dieser Geschwindigkeit durch Eichung nachprüfen, indem man das durchgegangene Medium anderweitig feststellt. Bei der Eichung muß bei Flüssigkeiten die Temperatur und bei Gasen auch der Druck der gleiche sein wie beim Versuch.

65. Kolbenmesser. *Kolbenwassermesser* werden vielfach für Kesselspeisezwecke verwendet. Den von *Schmid* zeigt Fig. 127. Das Wasser kann über und unter jeden der beiden Kolben treten. Dabei wird der Wasserzutritt und -abfluß zu jedem der Kolben durch den anderen gesteuert. Die Wasserführung wird mit Hilfe der Pfeile ermittelt werden können, wenn man beachtet, daß jeder der Kolben im oberen Teil zwei parallele und im unteren Teil zwei gekreuzte Kanäle hat; diese Kanäle bewirken die Steuerung; und wenn man weiter beachtet, daß der Kanal a nach dem Raum A über dem Kolben I, b nach B unter I, und entsprechend c nach C über II, d nach D unter II führt; die Wand $x\,y$ ist also nicht senkrecht, wie es in einem Schnitt scheint, sondern schräg gerichtet, wie der Schnitt oben links erkennen läßt. Der Messer ist ein Zwillingswassermotor, seine Umlaufzahl ist ein Maß für die durchgegangene Wassermenge; man liest diese an einem Zählwerk ab.

Der Kolbenwassermesser von *Eckardt* hat nur einen doppeltwirkenden Kolben, der an seinen Hubenden ein Steuergetriebe betätigt und einen Vierwegehahn umschaltet. Der amerikanische Worthington-Messer hat kein Kurbelgetriebe, die einfach hin und her gehen-

den Kolben steuern sich mit Hilfe besonderer Steuerschieber so, wie dies bei den bekannten Duplexdampfpumpen der Fall ist. Ganz ähnliche Messer werden in neuerer Zeit auch zum Messen von *Druckluft* angeboten.

Kolbenwassermesser dürfen, wenn die Räume sich gut mit Wasser füllen sollen, so daß die Meßgenauigkeit erreicht wird, und wenn der Druckverlust nicht sehr hoch werden soll, der verschlungenen Kanäle wegen, nur mäßige Umlaufzahlen machen. Sie sind daher, im Verhält-

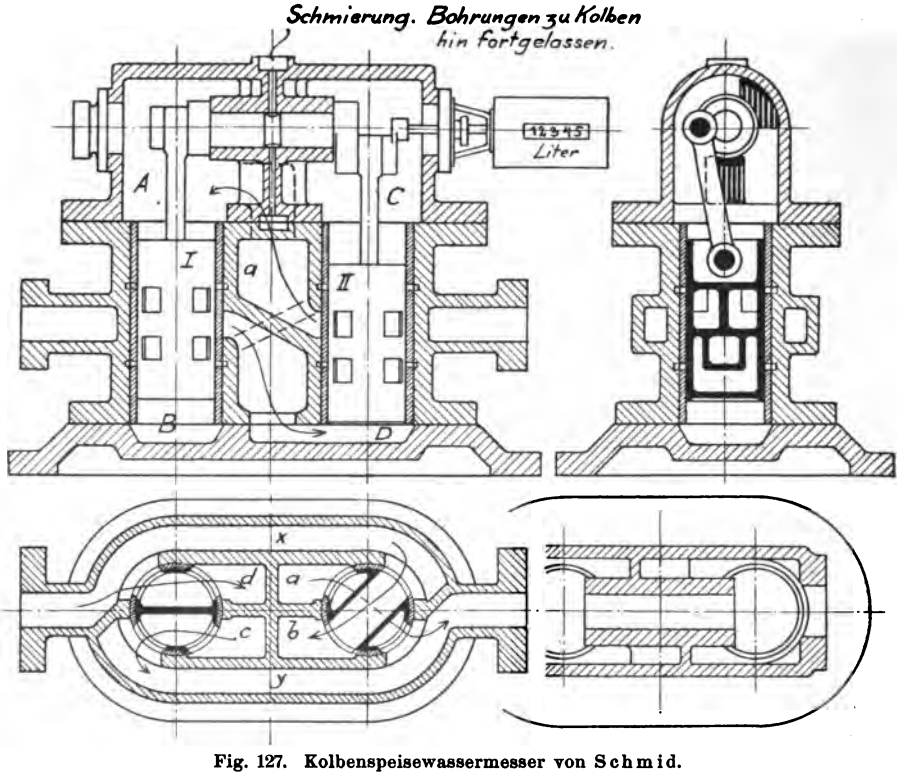


Fig. 127. Kolbenspeisewassermesser von Schmid.

nis zu der zu messenden Menge, umfangreich und teuer. Größere Dauerhaftigkeit bei guter Wartung ist ein Vorteil der langsamen Gangart, ähnlich wie bei langsamlaufenden Maschinen.

66. Geschwindigkeitsmesser. Für Wasser werden kleine Typen der Geschwindigkeitsmesser als Hausmesser gebraucht, für Anschlußrohrweiten von 13 mm aufwärts.

Einen *Flügelradwassermesser* zeigt Fig. 128. Das Wasser passiert das Sieb und tritt durch die tangential gebohrten Löcher *a* in den sog. Grundbecher *B*, treibt das Flügelrad *b* und tritt bei *c* aus. Das Flügelrad bewegt ein Zählwerk, das rein empirisch nach Kubikmetern geeicht wird. Wenn man die Öffnungen *c* verschließt, und dafür im Grundbecher

oberhalb der Mitte Öffnungen entsprechend *a*, jedoch entgegengesetzt tangential gebohrt, anbringt, dann wird der Messer von den beiden Strömungsrichtungen des Wassers (ungefähr) gleich beeinflußt. Solch Messer heißt *rückmessend*: sollte jemals Wasser in rückläufigem Sinne den Messer durchlaufen, wie das bei Pumpenstößen vorkommt, so wirkt dieses Wasser rückwärtsdrehend auf das Meßrad, und die rückgängige Menge wird von der rechtläufigen ohne weiteres abgezogen.

Andere Typen von Flügelradwassermessern lassen das Wasser auf das Rad nicht durch einen Kranz von kleinen Düsen, sondern durch eine große Düse auftreffen. (*Einstrahlmesser* von Meinecke, Fig. 129, von Dreyer, Rosenkranz & Droop). Das soll den Vorteil haben, daß die Messer für Schmutz weniger empfindlich sind; sie können daher eher ohne vorgeschaltetes Schmutzsieb verwendet werden. Es hat aber

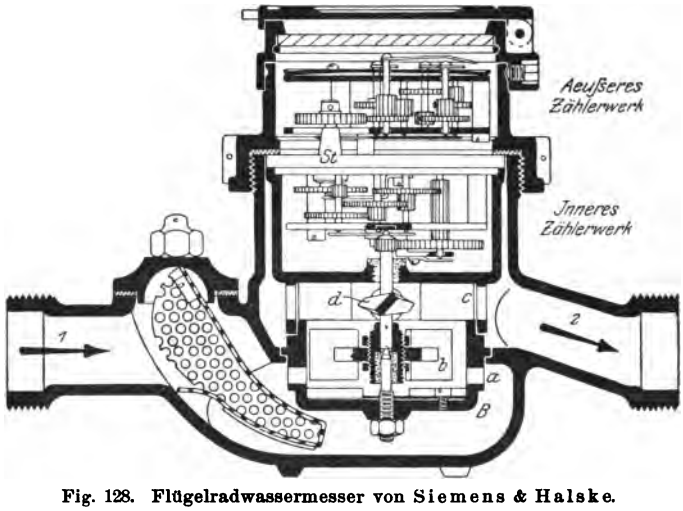


Fig. 128. Flügelradwassermesser von Siemens & Halske.

den Nachteil, daß eine Verstopfung des Siebes stärker auf das Flügelrad Einfluß hat, und daß durch die einseitige Beaufschlagung des Rades dieses und die Welle größere Reibung erfährt und sich mehr abnutzt.

Jeder Flügelradmesser muß irgendwie gestatten, das Verhältnis der Registrierungen bei verschiedenem Wasserfluß einzustellen. Dem Zweck dienen bei dem Wassermesser Fig. 128 die Flügel *d*, die von außen mittels Schlüssels um eine wagerechte Achse verdreht werden können. Das bewirkt wechselnde Wirbelbildung im oberen Teil des Messers, und beeinflußt die Proportionalität der Angabe. Ein anderes, bei Einstrahlmessern gelegentlich angewendetes Mittel ist es, die Neigung der Düsen gegen das Rad veränderlich zu machen, indem man eingesetzte kleine Buchsen verwendet. Das gleiche würde offenbar eine Erweiterung der Löcher *c* oder eine Änderung des Zählwerkes nicht leisten: durch solche würde die Registrierung bei kleinem und großem Wasserfluß gleichmäßig stark beeinflußt werden.

Mit Hilfe dieser Reguliereinrichtungen kann man erreichen, daß gute

Flügelradmesser neu bis herab zu Wasserdurchgängen richtig zeigen, die etwa 2% des Nenndurchganges ausmachen. Benannt aber werden die Wassermesser nach dem Wasserdurchgang, für den sie 10 m WS = 1 at Druckverlust ergeben. Bei geringerem Wasserdurchgang als 2% der *Nennleistung* (wir brauchen diesen üblichen Ausdruck, obwohl es sich nicht um eine Leistung im maschinentechnischen Sinne handelt) tritt schnell starke Minderanzeige ein, bis bei etwa 1% des Nenndurchgangs das Zählwerk zu laufen aufhört. Fig. 126 zeigt die für Flügelradmesser charakteristischen Kurven der Fehler und der Druckverluste.

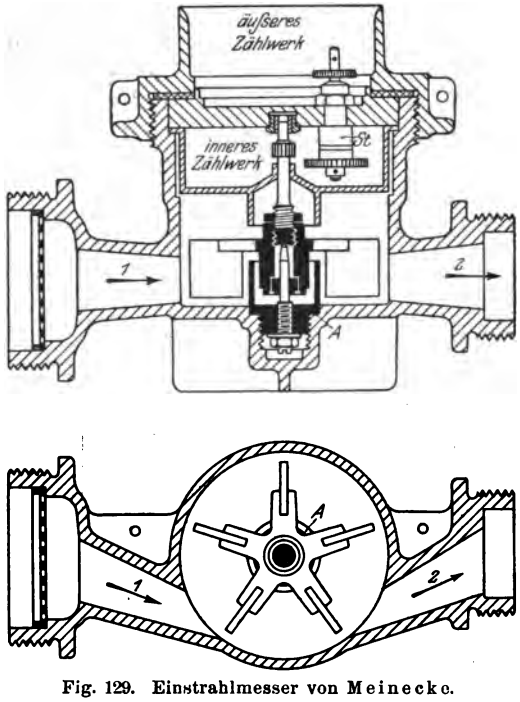


Fig. 129. Einstrahlmesser von Meinecke.

Die in Fig. 128 und 129 abgebildeten Messer sind *Trockenläufer*, das heißt nur ein inneres Zählwerk (Übertragungswerk) wird vom Wasser benetzt; einer der Triebe geht dann durch eine Stopfbüchse *St* hindurch zum äußeren Zählwerk, das mit Zeigern oder Zahlen den Stand ablesen läßt; die Triebe des äußeren Zählwerks laufen trocken, in Luft. Bei den *Naßläufern* liegen alle Triebe und auch das Zeigerwerk im Wasser. Die Vermeidung der Stopfbüchse bei den Naßläufern ergibt leichteren Gang und daher höhere Empfindlichkeit für kleine Durchflüsse; aber bei den wenigsten Wasserarten sind Naßläufer anwendbar, da das Glas leicht inkrustiert oder verschlammt und die Ablesung dann erschwert wird.

Um den Fehler zu geringer Anzeige bei kleinem Wasserdurchgang zu bessern, ordnet man *Wassermesserverbindungen* an: ein kleiner und ein großer Wassermesser werden parallel gesetzt, so daß die insgesamt durchgegangene Wassermenge durch Zusammenzählen beider Ablesungen zu finden ist. Der kleine Wassermesser dient dem Wasserdurchgang, solange er ausreicht; ein Ventil sperrt ebensolange den großen ab. Mit wachsendem Wasserdurchgang steigt der Druckunterschied zu beiden Seiten des Messers; übersteigt er einen gewissen Wert, so öffnet er selbsttätig das erwähnte Absperrventil und gibt den großen Messer frei, der nun aber schon in den Grenzen genauer Anzeige beansprucht wird. Sinkt der Wasserdurchgang wieder, so wird selbsttätig

durch den ebenfalls sinkenden Druckverlust das Ventil betätigt und der große Messer gesperrt.

Flügelradmesser wurden bis zu recht großen Abmessungen ausgeführt. Neuerdings bevorzugt man für große Rohrweiten, so als Hauptmesser für Wasserwerke, den *Woltmann-Wassermesser*. Derselbe besteht aus einem Woltmann-Flügel (§ 40), der in die Rohrleitung so eingesetzt wird, daß er ihren Querschnitt im wesentlichen ausfüllt. Die Flügelumdrehungen werden vom Zählwerk registriert. Bei dem Woltmann-Messer Fig. 130 ist der Flügel in eine besondere Buchse eingesetzt, die nach Bedarf ausgewechselt werden kann unter nur geringer Betriebsstörung. Für Messung von Schmutzwasser kann das angenehm sein. Zwar läßt der

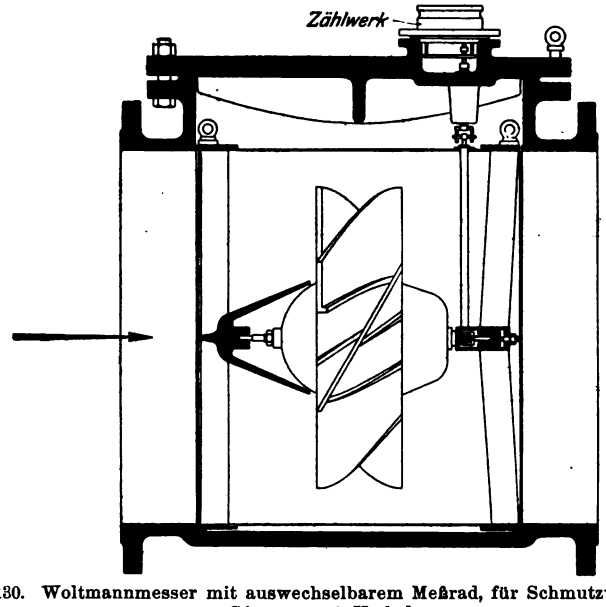


Fig. 130. Woltmannmesser mit auswechselbarem Meßrad, für Schmutzwasser, von Siemens & Halske.

Woltmann-Messer stückige Verunreinigungen gut passieren, ist auch tunlichst gegen Schlamm verkapselt, gegen letzteren aber immerhin empfindlich. Der Flügel besteht aus Zelluloid, ist daher im Wasser gewichtslos. — Fehlerkurve und Druckverlustkurve des Woltmann-Messers sind dem Charakter nach die gleichen wie die in Fig. 126 gegebenen Beispiele. — Der Woltmann-Messer liefert erhebliche Falschanzeigen, wenn das Wasser mit einer kreisenden Bewegung ankommt; damit ist nicht eine Turbulenz im Sinne der Mechanik gemeint, vielmehr eine einfache Rotationskomponente in der gesamten Wasserbewegung, die nach einer Schraubenlinie verläuft, so daß der Winkel der Wasserfäden gegen die Schaufelung sich ändert. Es werden deshalb Richtbleche vor den Messer gesetzt (Meinecke, Bopp & Reuther), oder es muß für eine genügend lange gerade Rohrstrecke vor dem Messer gesorgt sein.

Die gleiche Form eines Messers für Druckluft zeigt Fig. 131.

67. Kapselmesser. Für Flüssigkeiten sowohl wie für Gas werden Messer verwendet, die in der Wirkungsweise die Umkehrung eines Kapselgebläses oder einer Kapselpumpe sind — Kapselkraftmaschinen also, die sich unter dem Einfluß des Druckgefälles in Bewegung setzen, das sie in der Leitung veranlassen, und die dabei bei jedem Umgang so viel Flüssigkeit oder Gas durchlassen, wie der Verdrängung der Meßkammern entspricht.

Im Unterschied zu den Geschwindigkeitsmessern haben die Kapselmesser eine *zwangläufige Förderung* des Mediums. Sie gleichen hierin den Kolbenmessern, vor denen sie aber voraus haben, daß sie mangels hin und her gehender Teile größere Umlaufzahlen machen können, und daß sie daher weniger voluminös ausfallen als jene, sofern man einen einigermaßen bedeutenden Druckverlust zulassen kann.

Der Kapselmesser Fig. 132 wird für Wasser sowohl, wie für Preßluft gebraucht. Der Meßkolben *A* führt innerhalb der Meßkammer *BB* Bewegungen aus, die denen einer Pleuelstange gleichen. Der Führungs-

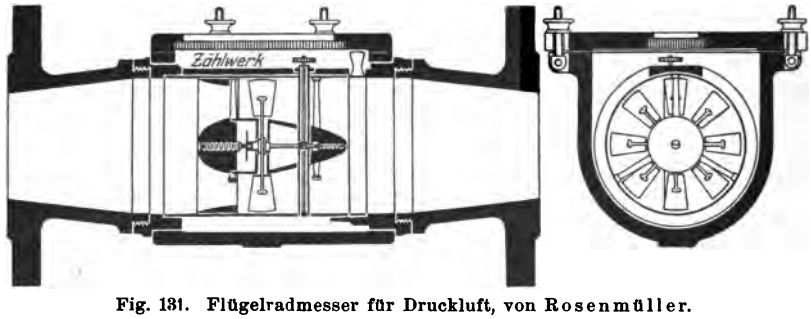


Fig. 131. Flügelradmesser für Druckluft, von Rosenmüller.

stift *C* läßt der Kolbenachse nur eine Kreisbewegung nach Pfeil *1*, die Scheidewand *D*, die in die Wandungen der Meßkammer eingelegt ist und über die ein Schlitz des Kolbens greift, führt dadurch einen Punkt des Kolbens geradlinig.

Das Wasser tritt nun, von links kommend, von unten her in eine (im Grundriß obere) Abteilung der beiden halbmondförmigen Räume ein, die einerseits zwischen Kammerwand und Kolben, andererseits zwischen dem Kolben und dem inneren zur Kammer gehörigen Ring gebildet werden und die sich im Sinne der Drehung mitverschieben bei einer Bewegung des Kolbens nach Pfeil *1*; die im Grundriß untere teils durch den Kolben, teils durch die Scheidewand *D* vollständig abgetrennte Abteilung des betreffenden Halbmondraumes steht mit dem Auslaß in Verbindung durch eine Öffnung im oberen Deckel der Meßkammer, die von der Eintrittsöffnung her, jenseits der Scheidewand liegt. Der Druckunterschied zwischen Ein- und Auslaß — der Druckverlust des Messers — veranlaßt die Meßkolbenmitte zur Bewegung nach Pfeil *1*. Er nimmt daher die beschriebene oszillierende Bewegung an. Bei jedem Umlauf geht dabei ein Volumen durch den Messer, das dem Inhalt der gesamten beiden halbmondförmigen Flächen, multipliziert

mit der freien Höhe der Meßkammer, entspricht. Die Umläufe werden durch ein Zählwerk gezählt, das Liter angibt. — Bemerkt sei noch, daß auf jeder Seite der Scheidewand *D* eine Öffnung und eine Tasche in den Stirnwänden des Messergehäuses sind. Dabei ist auf der einen Seite, nämlich am Eintritt, die Öffnung unten und die Tasche oben, auf der andern Seite ist es umgekehrt; die Taschen vermitteln den Druckausgleich des inneren und des äußeren Halbmondes. Der Mittelsteg des doppelt-T-förmig gestalteten Kolbens ist mit zahlreichen Löchern durch-

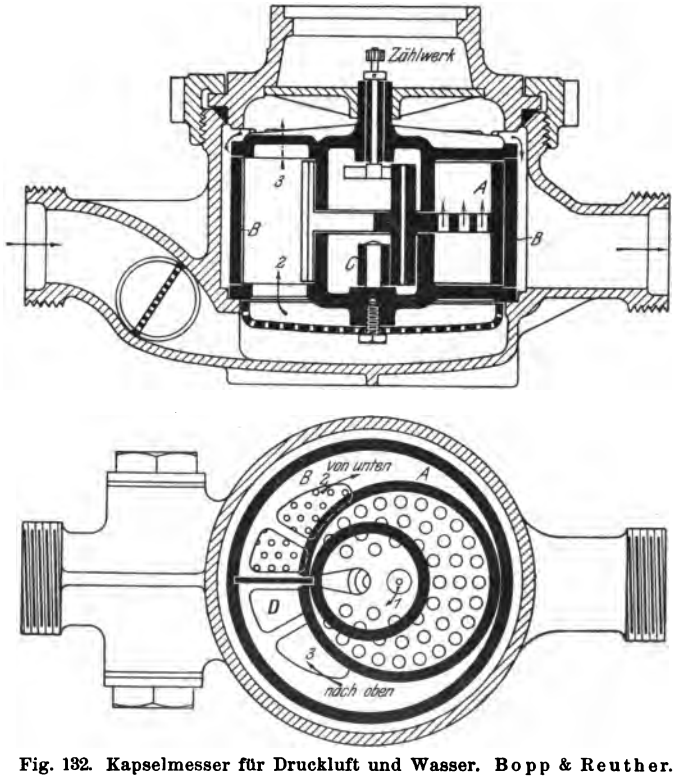


Fig. 132. Kapselmesser für Druckluft und Wasser. Bopp & Reuther.

bohrt; die Öffnungen sind für den Wasserdurchgang nötig, auch wird der Kolben dadurch leichter, die Massenwirkungen werden geringer, die bei der großen Umlaufzahl (bis zu 700 in der Minute bei kleinen Messern) immerhin nicht ganz unbedeutend sind.

Im Prinzip ähnlich diesem Messer ist der *Scheibenwassermesser*, der sich in den letzten Jahren neben den Flügelradmessern als Hausmesser für Wasserleitungszwecke eingebürgert hat, außerdem in Sonderausführungen als Kesselspeisewassermesser gebaut wird. Eine für letzteren Zweck dienende Form zeigt Fig. 133.

An Stelle der in der Ebene oszillierenden Bewegung tritt beim

Scheibenwassermesser eine Taumelbewegung der Meßscheibe A um die Mittelkugel herum. Sie führt diese Bewegung in der Meßkammer B aus, deren Seitenwände als Kugelzone, deren Böden als gegeneinandergekehrte Kegel gestaltet sind. Es wird der Scheibe nur diese Taumelbewegung übrig gelassen, da ihre Achse durch den Führungs-

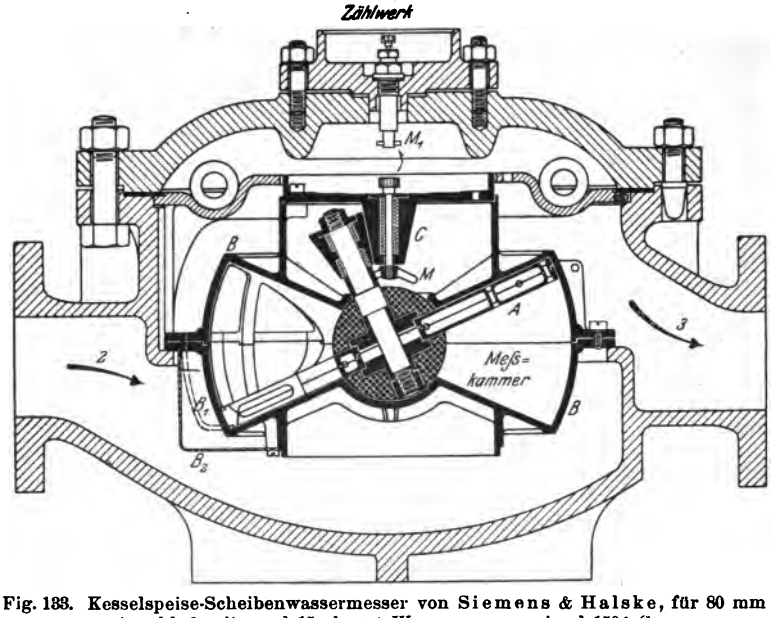


Fig. 133. Kesselspeise-Scheibenwassermesser von Siemens & Halske, für 80 mm Anschlußweite und 15 cbm/st Wasser von maximal 150° C.

konus C zur Seite gedrängt wird, so daß die Achse im Raum schiefstehen muß und nur eine Kegelbewegung um den Kugelmittelpunkt ausführen kann. Dabei wird die Scheibe mit einer Linie einerseits am unteren, andererseits am oberen Boden des Messergehäuses anliegen. Wie in Fig. 132 ist das Messergehäuse durch die Scheidewand D so zerlegt, daß das Wasser nur um die Kugel strömend von dem Eintritt diesseits der Trennungswand zum Austritt jenseits der Trennungswand gelangen kann, und wegen der Berührung der Meßscheibe mit dem Messergehäuse ist mit dem Wasserdurchgang die Taumelbewegung der Meßscheibe zwangläufig verbunden. Die Scheibe ist mit einem Schlitz versehen, der sich an der Scheidewand führt und eine Drehung der Scheibe verhindert; doch ist der Schlitz so gestaltet, daß die Taumelbewegung freibleibt. Bei einem Umlauf der Scheibe wird der Meßkammerinhalt einmal verdrängt — je zur Hälfte von der oberen und unteren Hälfte. Der Eintritt und Austritt des Wassers findet durch dreieckartige Öffnungen im Mantel der Meßkammer zu beiden Seiten der Scheidewand statt; durch aufgesetzte Taschen B_1 wird einerseits die Verbindung nur nach unten, andererseits die Verbindung nur nach oben freigegeben, und so dient der eine von beiden Eingängen dem Wasserzufluß, der andere dem Abfluß.

Für Wasserleitungszwecke pflegen Kugel und Scheibe aus einem Stück und aus Hartgummi zu bestehen. Bei Speisewassermessern für höhere Temperaturen wird die Kugel ebenso wie andere reibende Teile (Fig. 133 gekreuzt) aus Graphitkohle hergestellt. Die Umlaufzahl der Scheibe beträgt bei kleinen Messern bis zu 700, bei den großen Messern (bis 150 mm Anschlußweite) etwa 450 in der Minute bei voller Beanspruchung. Die Scheibe selbst besteht in Fig. 133 aus Bronze.

Bei vollkommener Abdichtung müßten diese Kapselmesser auch kleinste Mengen vollkommen registrieren. Nun ist aber die Abdichtung in der Mantellinie nicht dauernd vollkommen. Außerdem ist bei dem Scheibenwassermesser, um leichten Gang zu erzielen, der Anschluß der Meßscheibe an die Scheidewand eigenartig gestaltet, wie die Figuren es erkennen lassen. Vollkommene Abdichtung tritt hier überhaupt nicht ein, und kleine Mengen können stets ungemessen hindurchgehen. Daher ist die Fehlerkurve der Kapselmesser gleichen Charakters wie die von Flügelradmessern. Die Grenze unterer richtiger Angabe ist niedriger als bei Flügelradmessern (Fig. 126); bei längerer Benutzung mit unreinem Wasser werden die Kapselmesser mehr zum Stehenbleiben neigen, die Flügelradmesser mehr zum Fortlaufen unter falscher Anzeige.

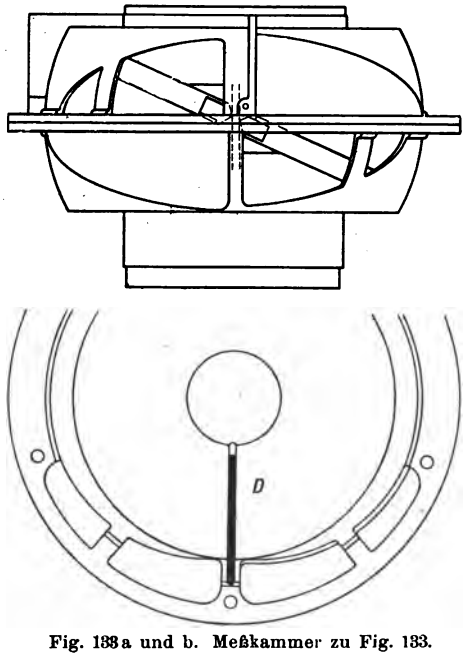


Fig. 133a und b. Meßkammer zu Fig. 133.

Für Versuchszwecke ist zugunsten der Kapselmesser anzuführen, daß ihre Angabe, da durch den Inhalt der Meßkammer festgelegt, stets die gleiche ist, unabhängig von der Art der Flüssigkeit, während eine solche Unabhängigkeit von der Art der zu messenden Flüssigkeit bei den nicht zwangläufigen Flügelradmessern nicht sicher ist. Für Messungen von anderen Flüssigkeiten als kaltem oder heißem Wasser werden besondere Messertypen „für industrielle Zwecke" hergestellt (Siemens & Halske), bei denen die Baustoffe dem Verwendungszweck angepaßt sind. Die Messer werden hauptsächlich für Flüssigkeiten verwendet, jedoch auch für *Druckluft*; für letztere wird der Messer Fig. 132 mit Reinnickelwerk ausgeführt. Sie ergeben Druckverluste ähnlicher Größenordnung wie die Flügelradmesser und sind daher für die eigentliche Gasmessung nicht geeignet, für die nur wenige Millimeter Wassersäule verfügbar sind.

68. Gasmesser sind eine eigenartige Form der Kapselmesser; wegen des Wasserverschlusses der Meßkammer heißen sie ***nasse Gasmesser***. Diese werden für Hausanschlüsse von Gaswerken neuerdings vielfach von den ***trockenen Gasmessern*** — kleinen Kolbenmaschinen, die hier nicht näher besprochen werden sollen — verdrängt, kommen jedoch für Versuchszwecke wegen ihrer großen Meßgenauigkeit in erster Linie in Frage, solange sie in genügender Größe zu beschaffen sind.

Gasmesser messen das Volumen des durch eine Rohrleitung gehenden Gases und registrieren die gesamte durch den Messer gegangene Gasmenge an einem Zeigerwerk. Vollständig dichter Abschluß ist durch Wasserverschluß gesichert.

Das Schema eines nassen Gasmessers zeigt Fig. 134. Der Messer besteht aus einer Trommel mit vier Kammern *A* bis *D*, die in einem feststehenden Gehäuse umläuft. Der untere Teil der Trommel taucht in Wasser; dieses verschließt und öffnet die Schlitze *a* bis *d*, durch die das Gas, von *E* kommend, in die vier Kammern eintritt, und die Öffnungen *a'* bis *d'*, durch die das gemessene Gas dem Austrittsrohr *F* zuströmt. Man sieht, daß Kammer *B* gerade gefüllt wird, und daß die Füllung von *C* eben begonnen werden soll; Kammer *A* entleert sich, während die Entleerung von *D* gerade beendet ist. Man sieht auch, daß bei keiner Lage der Trommel die Schlitze *a* und *a'*, oder *b* und *b'* usw. beide gleichzeitig frei sind, so daß Gas frei hindurch könnte; solange genügend Wasser im Messer ist, ist das Umlaufen der Trommel und daher die Registrierung der Gasmengen am Zeigerwerk Vorbedingung für den Gasdurchgang. Man sieht endlich, daß die Drehung der Trommel erzeugt wird, indem infolge des Spannungsunterschiedes zwischen Ein- und Auslaß der Wasserspiegel in der rechten Trommelhälfte einige Millimeter höher steht als in der linken, daher sinkt die rechte Hälfte der Trommel herab. Der Gasmesser ist also ein Motor eigentümlicher Bauart, der in seiner Meßtätigkeit den Kolbenwassermessern an die Seite zu stellen ist. Der für die Bewegung nutzbar werdende *Druckverlust* in der Gasuhr pflegt etwa 2 bis 3 mm WS zu betragen.

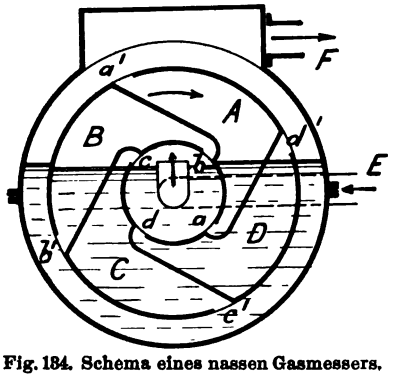


Fig. 134. Schema eines nassen Gasmessers.

Die Anordnung der Gasmessertrommel nach Fig. 134 wäre unpraktisch, weil sich die Schlitzweiten *a* bis *d* für den Gaseintritt schwer genügend groß dimensionieren ließen. Statt die Stirnwände der Trommel geschlossen herzustellen und die Schlitze an den inneren und äußeren Umfang zu legen, so daß das Gas radial durch die Trommel geht, verlegt man in praxi die Schlitze in die beiden Stirnwände und macht den Trommelumfang geschlossen. Das Gas tritt an einer Stirnwand ein, an der anderen aus, durchstreicht also den Messer in axialer Richtung.

Die Schlitze für Ein- und Austritt laufen fast radial über die Trommelstirnwände hin; dabei müssen Ein- und Austrittsschlitz einer Kammer *A* um ebensoviel gegeneinander versetzt sein, wie *a* und *a'* in Fig. 134 es sind, das heißt um fast 180°.

Solch Messer ist in Fig. 135 in Vorderansicht und im Schnitt dargestellt; der Gasweg ist durch Pfeile kenntlich gemacht. Wie die Trommel in Kammern geteilt ist, ersieht man aus der perspektivischen Ansicht (Fig. 136), bei der die zylindrische Außenhülle und die gewölbte Eintrittskappe fortgelassen sind. Die Kammer *A* wird durch die Schlitze *a* und *a'* bedient. Die Teilung wird durch vier Bleche von der Form Fig. 137 bewirkt, die außen an den Zylindermantel angelötet, innen durch die kleinen sternförmigen Teile an der Achse befestigt sind. Diese *Croßley-Trommel* ist ein recht kompliziertes räumliches Gebilde, dessen Wirksamkeit genau mit dem in Fig. 134 gegebenen Schema übereinstimmt. Sie ist aus verhältnismäßig schwachem Weißblech durch weiches Löten hergestellt.

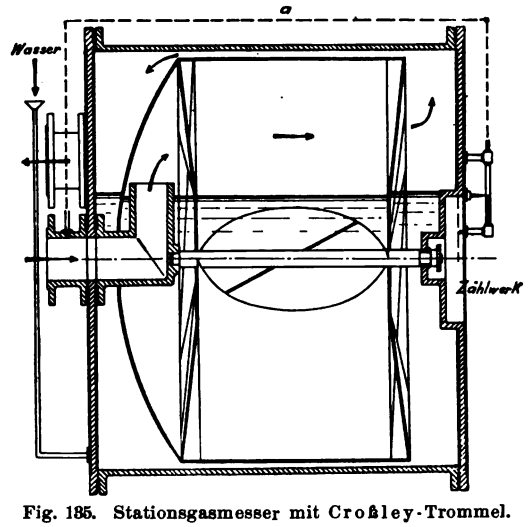


Fig. 135. Stationsgasmesser mit Croßley-Trommel.

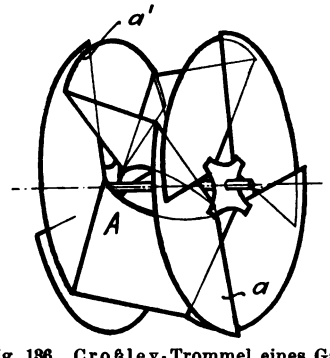


Fig. 136. Croßley-Trommel eines Gasmessers. Der zylindrische Mantel fehlt.

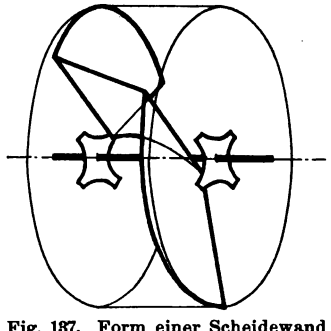


Fig. 137. Form einer Scheidewand bei Fig. 136.

Soll der Gasmesser genau messen, so darf er nicht zu schnell laufen, damit der Wasserspiegel ruhig bleibt. Kleine Messer machen 120, große nur 80 Umläufe in der Stunde. Daher ist der Gasmesser ein voluminöser und teurer Apparat.

Immer dasselbe Volumen Gas wird nur dann in jeder Kammer abgeteilt, wenn der Wasserspiegel immer dieselbe Höhe hat. Das durchstreichende Gas aber sättigt sich mit Wasserdampf, und so vermindert sich die Wassermenge. Für Hausanschlüsse bei Gasbeleuchtung hat man wohl Messer mit „Rückmessung", bei denen durch eine komplizierte Kammerteilung der Einfluß des Wasserstandes ziemlich aufgehoben wird. Sinkt der Wasserspiegel zu weit, so schließt ein herabsinkender Schwimmer die Gaswege ganz ab. Diese Einrichtungen interessieren uns hier nicht. Für unsere Zwecke werden wir stets einfache Messer, *Experimentier-* oder *Stationsmesser* genannt, verwenden und für richtigen Wasserstand sorgen. Zu dem Zwecke haben die kleinen Experimentiermesser eine Füllöffnung und eine Ablauföffnung; beide schraubt man auf, gießt durch die eine Wasser nach, bis es an der anderen überläuft, läßt ablaufen und verschließt beide Öffnungen wieder. In den großen Stationsmessern, Fig. 135, zirkuliert dauernd Wasser und läuft bei A über einen Überlauf hinweg ab, so daß durch die Höhenlage des Überlaufs der Wasserstand gegeben ist, und zwar der Wasserstand in den sich füllenden Kammern. Dazu ist der Überlauf durch den Hahn H_1 mit dem Gaseintritt verbunden. Um wagerechte Aufstellung zu sichern, sind Experimentiermesser mit einer Libelle versehen. Stationsmesser haben Meißelhiebe an verschiedenen Stellen des Gehäuses, die nach der Wage auszurichten sind.

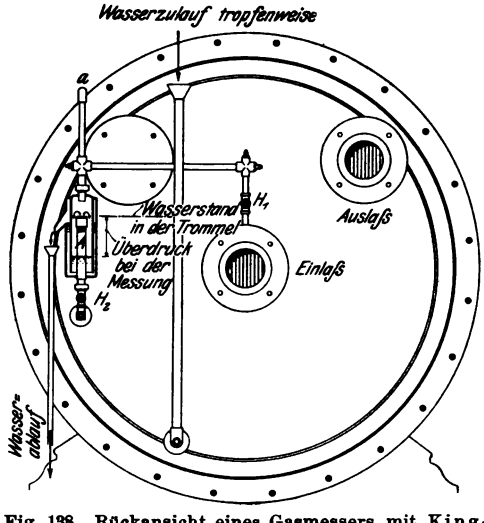


Fig. 138. Rückansicht eines Gasmessers mit Kingschem Überlauf. S. Elster.

Bei jeder Messung sind *Druck und Temperatur* zu beobachten, und zwar ist der Druck und die Temperatur des Gases in der sich füllenden Kammer am Ende der Füllungsperiode maßgebend; das Wassermanometer, Fig. 135, ist deshalb mit dem Gaseintritt zu verbinden (Rohr a). Die Temperatur aber wird man am Gasaustritt messen, weil das Gas am Ende der Füllungsperiode schon durch Berührung die Temperatur des Messers und des Wassers angenommen hat; beim Eintritt in den Messer kann es irgendeine andere Temperatur haben. Wünschenswert ist es auch, daß die Messer schon lange genug mit dem zu benutzenden Gas gelaufen sind, so daß das Wasser damit gesättigt ist.

Eine häufig verwendete Anordnung der Rohrleitungen auf der Rückseite des Gasmessers ist in Fig. 138 wiedergegeben. Außer dem Einlaß- und dem Auslaßrohr sowie einem blindverflanschten Reserve-

auslaß für linksseitigen Anschluß sehen wir den Trichter für den Wasserzulauf sowie den *Kingschen Überlauf A*. Die Hähne H_1 und H_2 sind während des Betriebes jederzeit offen zu halten. Wäre insbesondere H_1 geschlossen, so würde nicht der Gasüberdruck im Einlaß auf das Überlaufrohr *A* wirken, es würde also zu viel Wasser aus dem Überlauf austreten, zu wenig Wasser im Messer zurückbleiben, und es würde eine Minderregistrierung eintreten. Die Höhe des Überlaufs *A* ist verstellbar.

Wo man mit einer Gasuhr den Verbrauch einer Gasmaschine mißt, stört der intermittierende, hubweise stattfindende Verbrauch der Maschine den Gang des Messers. Dann schafft ein zwischengeschalteter Behälter von genügender Größe oder — wenn das Gas unter Druck steht — ein nachgiebiger Beutel aus gummiertem Stoff Abhilfe. Steht das Gas unter Saugspannung, so kann man einen runden Behälter oder eine runde flache Dose mit gummiertem Stoff verschließen und, etwa durch Federn, dafür sorgen, daß der Stoff nicht eingesaugt wird und also nachgiebig bleibt.

Die *Eichung* kleinerer Gasmesser geschieht, indem man Luft aus einer Glocke (Fig. 139) oder einem kalibrierten Gefäß durch den Messer schickt. Die Eichung pflegt für Gasanstaltszwecke bei etwa 40 mm Wassersäule Überdruck zu geschehen. Sonst bewirkt man sie möglichst unter den Verhältnissen, die bei dem anzustellenden Versuch herrschen, für einen Sauggasmotor also bei Unterdruck. Es verschlägt nicht viel, wenn die Glocke für den Messer zu klein ist. Man füllt sie wiederholt und schickt eine Füllung nach der anderen durch den Messer. — Glockenapparate, die speziell für schnelle Eichung von Gasmessern in größerer Zahl eingerichtet und teilweise selbsttätig sind, mit dazugehörigen Anschlüssen, heißen Eichstationen oder *Kubizierapparate* und werden von den Verfertigern von Gasmessern listenmäßig hergestellt für die Bedürfnisse der Gasanstalten, die die Hausmesser regelmäßig nachprüfen müssen.

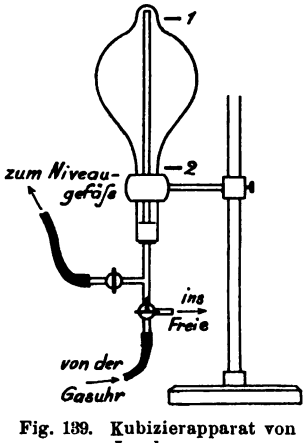


Fig. 139. Kubizierapparat von Junkers.

Statt einer Glocke kann man auch die Einrichtung Fig. 139 verwenden. Die Glasbirne hat zwischen den Marken *1* und *2* einen bekannten Inhalt. Durch Heben und Senken einer mit Schlauch angeschlossenen Niveauflasche und Steuern des Dreiweghahnes saugt man eine Füllung nach der andern vom Messer an und entläßt sie ins Freie.

Große Messer eicht man meist mit Hilfe eines kleineren Normalmessers; durch beide Messer hintereinander wird die gleiche beliebige Luftmenge geschickt, beider Angaben müssen gleich sein. Man eicht mit der sekundlichen Luftmenge, welche der Normalmesser zuläßt, und benutzt den größeren dann bis zu der Umlaufzahl, die erfahrungsmäßig zulässig ist — wie erwähnt, 80 bis 120 in der Stunde. Besser ist es, mehrere parallel geschaltete kleine Normalmesser zu verwenden, deren Gesamtleistung der Höchstleistung des zu eichenden Messers gleichkommt.

Beim Eichen müssen alle Apparate und ihr Wasserinhalt gleiche Temperatur haben. Unterschiede von 2,73° C entsprechen einem Fehler von 1%. Korrektionen, durch die man ungleiche Temperaturen berücksichtigen wollte, sind immer unsicher, weil ja nicht nur das Gas, sondern auch die Meßapparate mit der Temperatur sich ausdehnen, wenn auch weniger. Eine Gasmessereichung muß also eigentlich auch noch bei derselben Temperatur vorgenommen werden, bei der der Messer später benutzt werden wird.

Gasmesser kann man (in Preußen) von den Eichämtern eichen lassen, Normalgasmesser insbesondere auch von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

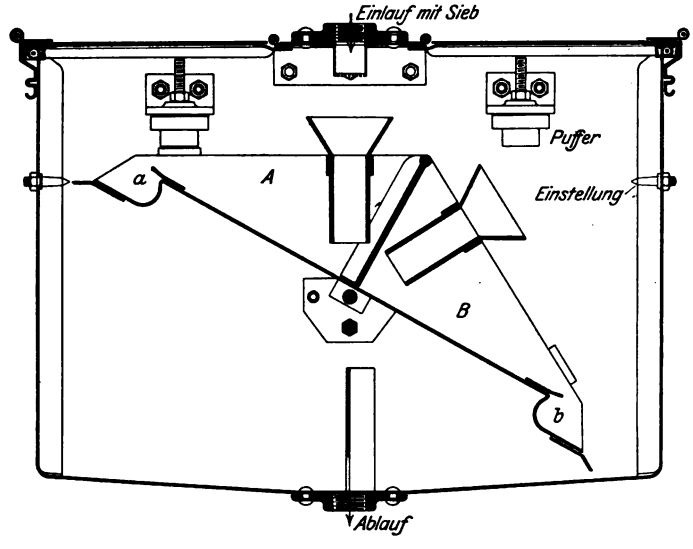


Fig. 139a. Kippwassermesser von Eckardt.

69. Kippmesser. Bei den bisher genannten Formen von Flüssigkeitsmessern war es Voraussetzung, daß sie fest in eine Leitung eingebaut werden, die von Wasser ganz erfüllt ist und im allgemeinen überdies unter Druck stehen wird. Die folgenden Formen gestatten und verlangen einen solchen Einbau nicht. In sie muß vielmehr das Wasser frei einlaufen, um nach unten hin wieder frei abzulaufen. Während bei den geschlossenen Wassermessern das Gehäuse als Abschluß erforderlich ist, dient es bei den *offenen Wassermessern* lediglich dazu, um Verspritzen des Wassers und Verschmutzen des Messers zu verhüten. Auch soll durch das Gehäuse das Verdunsten heißen Speisewassers vermieden werden, indem die Diffusion des im Gehäuse stehenden Wasserdunstes gegen die Außenluft einigermaßen verhindert wird.

Mäßigen Ansprüchen an Genauigkeit genügen die sehr einfachen Kippwassermesser aus einem zweiteiligen Gefäß, dessen beide Hälften sich abwechselnd füllen, worauf jedesmal die gefüllte das Übergewicht

erlangt und herunterklappend sich entleert, die andere dabei zum Füllen freigibt. Die Kippgefäße werden für kleine Messer aus Gußeisen hergestellt, für größere Messer auch aus Schmiedeeisen. Bei Fig. 139a verhütet ein Trichtereinlauf das Verspritzen des Wassers, außerdem soll die Meßgenauigkeit etwas gesteigert werden, indem das Überkippen in folgender Weise eingeleitet wird. Wenn die Hälfte *A* sich gefüllt hat, so läuft Wasser über die linke Kante in die Rinne *a*, dadurch wird plötzlich der Schwerpunkt verlegt, das Gefäß kippt und entleert sich ins Gehäuse. Die Anzahl der Kippungen wird von einem Zählwerk registriert, auch kann das Zählwerk gleich zur Angabe von Kubikmeter durch Zahnradübersetzung eingerichtet werden. Der Messer reagiert ersichtlich auf das Volumen, obwohl eine Schwerpunktsverlegung das Kippen veranlaßt. Bei heißem Wasser oder bei anderen Flüssigkeiten wird also das spezifische Gewicht zu ermitteln sein, will man das gemessene Gewicht finden. — Bei anderen Ausführungsformen wird noch der Stoß des Kippens durch eine Dämpfung gemildert, indem ein am Kippgefäß angebrachter Flügel in Wasser fällt, das sich im Gehäuse anstaut, dessen Ablauf nicht am Boden ist.

Eine hohe Meßgenauigkeit wird man von diesen Messern aus folgenden Gründen nicht erwarten können. Es muß nämlich eine gewisse Abhängigkeit der Anzeige von der Stärke des Wasserflusses vorhanden sein. Das Kippen wird stets bei einer bestimmten Füllung der Rinne *a* eingeleitet werden. Dann läuft aber noch weiterhin Wasser in die Hälfte *A a* so lange, bis die Scheidewand zur Hälfte *B b* unter dem Einlauf hinweggegangen ist. Bis dahin wird nun vom Beginn des Kippens ab eine bestimmte Zeit verflossen sein; um die in dieser Zeit zugeflossene Wassermenge wird die durchgegangene größer sein als die zum Einleiten der Kippbewegung erforderliche Wassermenge. Der Mehrbetrag hängt aber von der Stärke des Wasserzuflusses ab. Zur Vermeidung eines weiteren Fehlers, der aus der Stoßwirkung des Wassers auf den Wasserspiegel im Kippgefäß entstehen könnte, ist die Einfüllung des Wassers gerade über der Achse vorgesehen. Auch die Störung des ruhigen Wasserspiegels durch die zufließende Wassermenge wird zu beachten sein, allerdings wird sie meist in dem Sinne wirken, daß der hieraus entstehende Fehler sich mit dem vorher erwähnten etwas ausgleicht.

Viel größere Genauigkeit ergibt der Wassermesser Fig. 140, in dem die Füllung nur ungefähr durch den vollen Wasserstrom bewirkt wird, während das genaue Abgleichen bis zum Kippen durch einen schwachen und überdies immer gleichmäßigen Wasserstrom erfolgt. Es sind zwei unabhängig voneinander kippende, auf Schneiden gelagerte Gefäße *A* und *B* vorhanden. Jedes derselben kippt über, wenn die Flüssigkeit in ihm ein gewisses Gewicht erreicht hat: es entleert sich dann durch ein Rohr, das zunächst als einfacher Ausfluß wirkt. Wenn aber späterhin das Gegengewicht das Gefäß zurückfallen läßt, wird trotzdem die Entleerung nicht unterbrochen, weil das Rohr noch als Heber so lange wirkt, bis in sein äußeres Ende Luft tritt und den Heber plötzlich zum Abreißen bringt. Durch Anordnung eines Sumpfes von kleiner Oberfläche wird erreicht, daß immer eine be-

stimmte Wassermenge zurückbleibt, bzw. daß die Unsicherheit an der Oberfläche wenig Einfluß hat. — Das Füllen wird nun in folgender Weise bewirkt. Die Hauptrinne und die Nebenrinne lassen Wasser in das eine oder in das andere Gefäß laufen, je nach ihrer Stellung. Aus der Hauptrinne tritt jederzeit ein gleichmäßiger Wasserstrom durch Schlitze in der Achse in die Nebenrinne über. Wenn nun eines der Meßgefäße sich füllt, so steigt davon der Schwimmer an und steuert zu passender Zeit die Hauptrinne um, worauf diese ihr Wasser bereits in das andere Gefäß ergießt, während die Hilfsrinne weiterhin in das erste

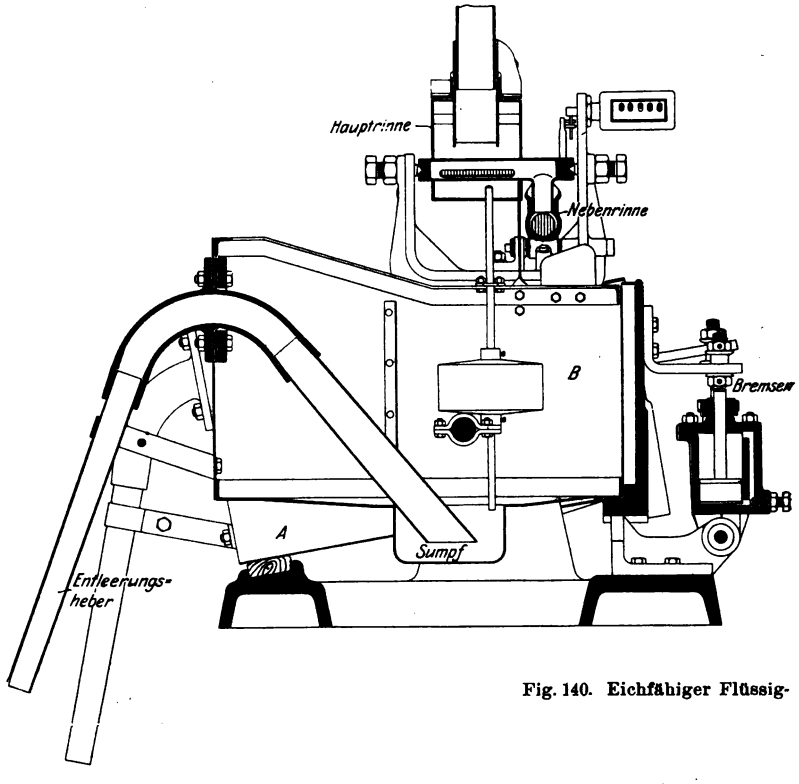
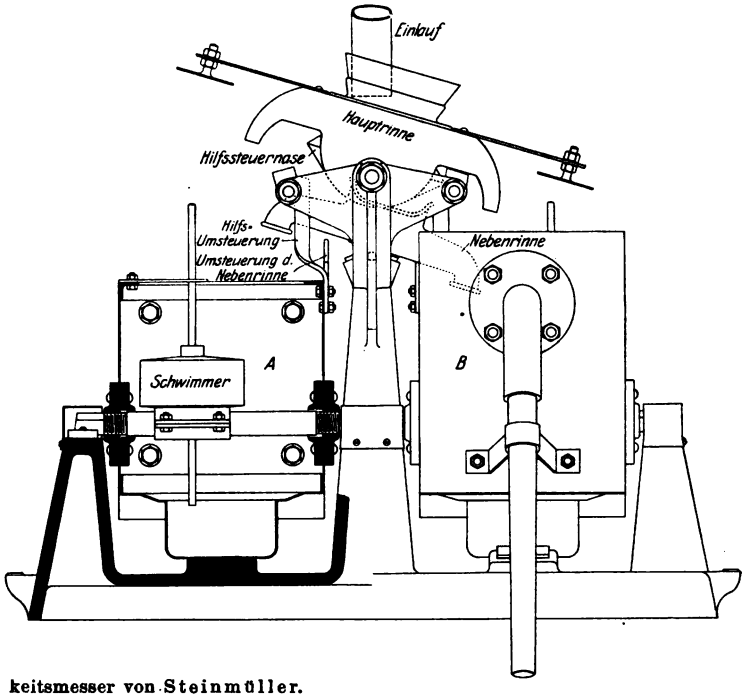


Fig. 140. Eichfähiger Flüssig-

ausgießt. Das erste Gefäß füllt sich nun langsam und, unabhängig von der Stärke des Wasserzuflusses, stets gleichmäßig weiter an. Da der Schwerpunkt des Wasserinhalts, von den Gegengewichten aus gerechnet, jenseits der Schneiden liegt, so rückt der Schwerpunkt des Ganzen langsam auf die Schneiden zu, bis das Kippen stattfindet, im Augenblick, wo er über dieselben hinweggeht. Im Fallen steuert das Gefäß die Nebenrinne auf das andere Gefäß um. Doch ist dafür Sorge getragen, daß die Nebenrinne nicht etwa auf dem kippenden Gefäß bereits aufliegt, da sonst wechselnde Reibung in der Rinnenlagerung den Zeitpunkt des Kippens beeinflussen könnte.

Ein wesentliches Konstruktionsmerkmal ist es, daß die beiden Seitenwände der Kippgefäße, die den Schneiden parallel laufen, im ungekippten Zustande senkrecht sind. Namentlich die in der Kipprichtung gelegene ist bei manchen Bauarten schräg. Das hätte aber zur Folge, da die Schwerpunktslage des Flüssigkeitsinhaltes vom eingefüllten Volumen abhängt, daß das Kippen nicht mehr bei einer bestimmten Gewichtsfüllung erfolgt, sondern vom spezifischen Gewicht der eingefüllten Flüssigkeit abhängig wird; die Anordnung bringt dann aber auch nicht rein das Volumen zur Messung.



keitsmesser von Steinmüller.

Die Anordnung (Fig. 140) gilt unter den offenen Flüssigkeitsmessern als eine der genauest arbeitenden; ihre Genauigkeit wird zu $^1/_{10}$% angegeben; die Normaleichungskommission hat sie zur amtlichen Eichung zugelassen. Für langdauernde Meßperioden (Ablesung morgens und abends im Kesselhausbetriebe) und für Vermessung von Flüssigkeiten von stets fast gleichem spezifischen Gewicht (Speisewasser, nur geringe Abhängigkeit des spezifischen Gewichtes von der Wassertemperatur) wird gegen die Anordnung nichts einzuwenden sein. Für eigentliche Versuchszwecke kann es als lästig empfunden werden, daß der Zeitpunkt des Kippens nicht die Einfüllung einer bestimmten Wassermenge bedeutet, weil ja ein Teil des Wassers schon vorher durch die Hauptrinne in das andere Gefäß geleitet wurde. Eine Beobachtung der

Wassermenge durch Feststellen der Zeit für nur wenige Kippungen kann also bei wechselndem Wasserfluß zu Fehlern führen.

Der offene Wassermesser Fig. 141, der in einem runden Gehäuse untergebracht zu werden pflegt, ist zur Messung des Kondensates von Niederdruckdampf-Heizungsanlagen recht gebräuchlich, er wird dazu in die Kondensleitung eingeschaltet. Das Werk liegt in einem Gehäuse von runder Trommelform und gleicht dann äußerlich einem Gasmesser. Im Innern ist auf einer Achse eine kreiszylindrische Trommel angebracht, deren Inneres durch Scheidewände in drei Kammern geteilt ist. Der Wasserzufluß erfolgt durch ein die Achse umgebendes Ringrohr. Zurzeit läuft Wasser in die Kammer *A*, während *C* sich entleert und *B* außer Tätigkeit ist. Sobald *A* voll ist, wird sich das Wasser im Zulauf anstauen, bis es durch die Öffnung *b* in die Kammer *B* zu laufen beginnt. Dann gewinnt die linke Seite der Trommel das Übergewicht in solcher Weise, daß die Trommel um 120° klappt und nun *B* gefüllt wird, während *A* sich entleert. Jede Umdrehung entspricht also dem Inhalt der drei Kammern.

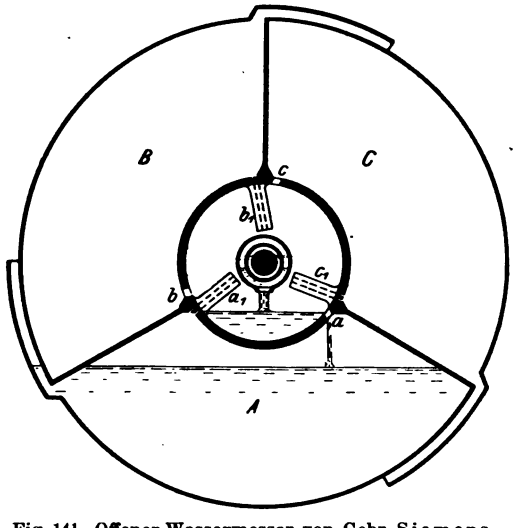


Fig. 141. Offener Wassermesser von Gebr. Siemens.

Von einigen Eigentümlichkeiten der offenen Messer gegenüber den geschlossenen war früher schon die Rede (S. 165). Wertvoll ist es oft, daß sie einen sehr geringen, nur ihrer Bauhöhe entsprechenden Gefälleverlust geben, der überdies bei allen Beanspruchungen konstant bleibt; auch werden sie, von Tröpfelwasser abgesehen, notwendig schon kleinste Wassermengen nicht ungemessen durchgehen lassen; ob sie bei allen Beanspruchungen gleich registrieren, wird insbesondere von der Güte der Arbeit abhängen.

Besonders zu beachten bleibt, daß offene Messer nicht ohne weiteres unbeaufsichtigt bleiben können, da sie nicht von selbst dem Bedarf entsprechend wechselnde Wassermengen liefern, sondern immer die ihnen gerade zufließende verarbeiten. Das ist nicht immer ebensoviel, wie verbraucht wird. Läuft ihnen etwa bei einer Kesselspeisung das Wasser aus einem Behälter zu und ist selbst, was erwünscht ist, ein zweiter Vorratsbehälter zwischen Messer und Speisepumpe geschaltet, in den der Messer entleert und aus dem die Pumpe saugt, so wird man Obacht geben müssen, damit nicht dieser zweite Behälter überläuft oder das Wasser im Messer sich anstaut; beides würde die Messung

fälschen. Diese Sorge entfällt, wo eine insgesamt beschränkte Wassermenge vorhanden ist, wie bei Rückführung des Heiz- oder Maschinenkondensates. —

Das Prinzip der Kippwassermesser ist außer für Flüssigkeiten aller Art auch für *körniges Fördergut* verwendbar. Als Kohlen- oder Getreidewagen kommen Anordnungen ähnlich Fig. 140, mit einem oder zwei Gefäßen, vor (Reuther & Reisert) sowie auch um eine Achse drehbare Anordnungen ähnlich (Fig. 141) (Polysius).

70. Kontinuierliche oder automatische Wägung. Ebenfalls für die Verwiegung körnigen Gutes in kontinuierlichem Transport dient die Einrichtung Fig. 142, die in folgender Weise arbeitet und dabei einen Gefälleverlust sowie auch das mehrfache Überschütten vermeidet, das nicht jedem Fördergut zuträglich ist. Das Förderband oder die Becherkette wird wagerecht über die Wagenbrücke geleitet, die in die Fahrbahn eingebaut ist. Die Hebel der Brücke wirken auf eine Neigungs-

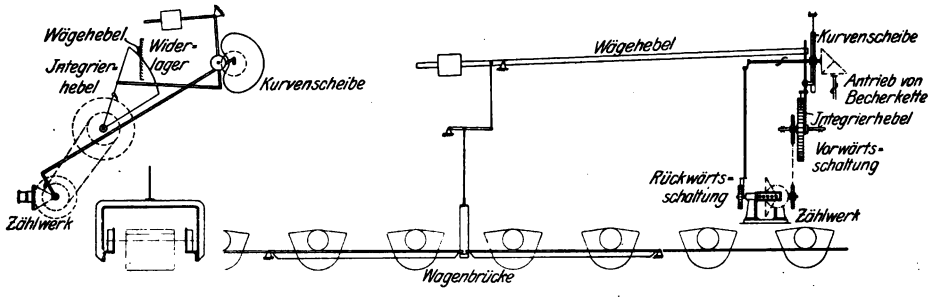


Fig. 142. Selbsttätige Wage für körniges Gut in ständiger Förderung. Carl Schenck.

wage, deren Wägehebel dadurch in Stellungen kommt, die von der augenblicklichen Belastung der Brücke mit Fördergut abhängt. Die durch die Stellungen des Wägehebels angegebenen Gewichte werden nun fortlaufend integriert: dazu wird von der Becherkette aus eine Welle angetrieben, die mit Hilfe einer Kurvenscheibe einen Integrierhebel zu Ausschlägen bringt, deren Anzahl daher von der Geschwindigkeit der Kettenbewegung abhängt. Bei jedem dieser Ausschläge schaltet der Hebel ein feingeteiltes Zahnrad vorwärts. Die Bewegung des Integrierhebels und damit die Schaltung erreicht ihr Ende, wenn die Kurve des Integrierhebels gegen den Wägehebel der Neigungswage stößt: sie erreicht daher um so später ihr Ende, je größer die gerade augenblicklich auf dem Brückenhebel befindliche Last ist. Durch Gestaltung der Kurve des Integrierhebels läßt sich Proportionalität erreichen zwischen der Belastung der Wagenbrücke und den jeweiligen Registrierwegen. Die Tara der Kette wird durch Rückwärtsschalten des Schaltwerkes automatisch von dem Bruttogewicht in Abzug gebracht; dazu ist eine Gegenkurbel an der Welle vorgesehen, die rückschaltend auf das Zählwerk wirkt. — Mit der Einrichtung sollen sich Wiegeergebnisse von 1 bis 2% Genauigkeit erreichen lassen. Das wäre sehr befriedigend für

Betriebszwecke, wenngleich es nicht für die Eichfähigkeit der Anordnung ausreichend ist. —

Eine weitere Aufgabe ist es, beliebige unregelmäßig auf einer Bahn verkehrende Lasten so zu registrieren, daß das Zutun des Menschen ausgeschaltet ist, wobei gleichzeitig Vorsorge gegen Betrügereien geschaffen werden soll, um für Lohnabrechnungen und ähnliches zuverlässige Unterlagen in den Angaben der Wage zu erhalten. Die bekannte *automatische Wage von Schenck* (Fig. 143) arbeitet wie folgt. Ein voller Wagen beliebiger Füllung zwischen einer Mindest- und einer Höchstlast wird auf die Wagenbrücke geschoben. Ein Sperrbolzen verhindert, daß der Wagen über die Brücke fährt, ohne verwogen zu sein. Sobald der Wagen auf der Brücke steht, senkt sich die Brücke, betätigt dadurch zunächst einen Sperrbolzen auf der anderen Seite der Brücke, der es unmöglich macht, den Wagen zurückzunehmen, nachdem die Wägung einmal eingeleitet ist. Außerdem wird durch das Herabsinken der Last der Auswiegeapparat in einem Wiegehaus seitlich der Brücke freigegeben. Zunächst muß ein Anschlag durch einen Schlitz gehen, den er nur findet, wenn die Last auf der Brücke sich in den richtigen Grenzen hält; ist das der Fall, so wird die Arretierung des Wagebalkens gelöst und zugleich ein senkrecht beweglicher Treibschieber freigegeben, der durch Zahnradgetriebe mit dem Laufgewicht des Wagebalkens zwangläufig verbunden ist. Durch passende Anordnung der Zahnräder ist Vorsorge getroffen, daß der Zahndruck kein Moment auf den Wagebalken ergibt. Der Treibschieber beginnt sich zu senken und schiebt das Laufgewicht auf dem Wagebalken vorwärts. Zugleich wird dadurch das Zählwerk der Wage betätigt. Der Vorgang wird unterbrochen in dem Augenblick, wo der Wagebalken nach unten schlägt, weil das Laufgewicht die Sollstellung erreicht hat. In diesem Augenblick fällt nämlich eine Sperrklinke in den Treibschieber ein und hält ihn fest, während zugleich durch den auf die Sperrklinke ausgeübten Druck der Sperrhebel hinter der Wagenbrücke gesenkt und die Abfahrt des Wagens freigegeben wird. Sobald der Wagen ganz abgefahren ist, hebt sich die Brücke unter dem Einfluß eines Gegengewichtes, die beiden Sperrhebel wechseln dabei ihre Lage, der Treibschieber wird in seine Höchstlage gebracht, und die Wage ist zu Ausführung der nächsten Wägung vorbereitet. — Da eine Mindest last zum Betätigen des Wiegemechanismus gefordert wird, so ist es nicht möglich, daß Menschen, die zufällig über die Brücke gehen, oder andere Unregelmäßigkeiten von mäßigem Betrage mitregistriert werden.

Eine neuere Ausführung dieser Wagen vermeidet indessen die Forderung einer Mindestlast: Es werden alle Lasten von Null bis zu einer Höchstlast zur Registrierung gebracht. Dazu wird, ähnlich wie bei Laufgewichtswagen, zunächst ein größeres Laufgewicht durch die Treibschiene betätigt. Dieses hört rechtzeitig auf, und die genaue Wägung wird durch ein zweites kleineres Laufgewicht vollendet. Die Bewegungen beider Laufgewichte betätigen getrennte Zählwerke, die Gesamtlast ist jederzeit durch Zusammenzählen der Angaben beider Zählwerke zu ermitteln.

Bei einer anderen Konstruktion wird die Messung nicht durch einen herabsinkenden Treibschieber, sondern durch die Energie eines Schwungrades bewirkt, welches sich unter dem Einfluß der herabsinkenden Last in Bewegung setzt und dann die Wägung ausführt. Die Konstruktionen sind eichfähig; wegen ihrer Ausführung im einzelnen kann auf die in Vorbereitung begriffene Auflage der „Bildlichen Darstellungen eichfähiger Konstruktionen, herausgegeben von der Kaiserlichen Normal-Eichungskommission" verwiesen werden sowie auch auf die „Mitteilungen" der gleichen Kommission, die regelmäßig

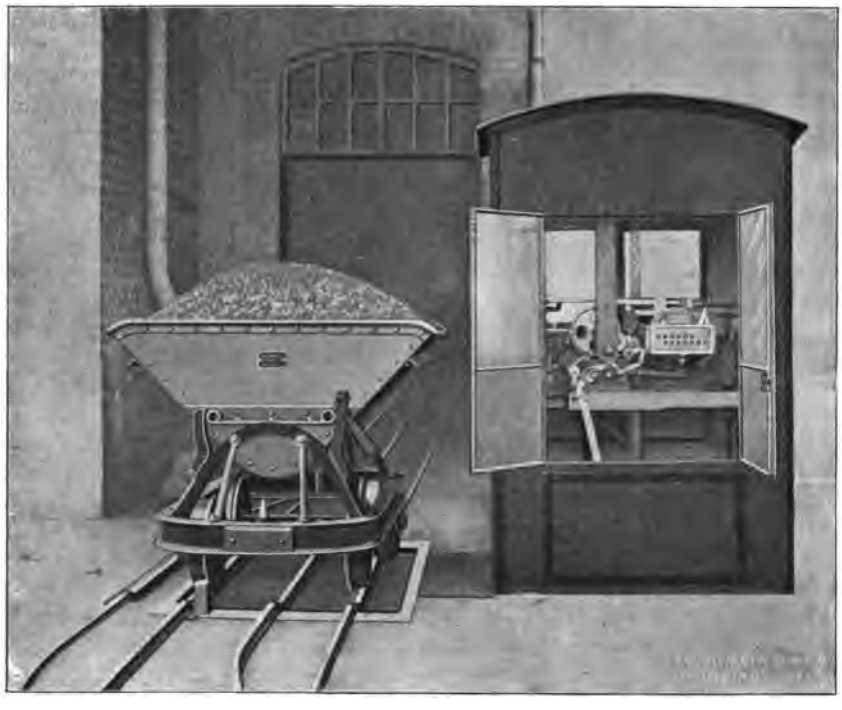


Fig. 143. Selbsttätige Wage von Carl Schenck.

erscheinen. — Die Sperrbolzen verhindern, daß leere Wagen über die Wage zurückgeschoben werden. Für den Rückgang derselben muß ein besonderes Geleis angelegt werden (Fig. 143). Oft wird in dasselbe eine Einbruchstelle eingebaut, die es unmöglich macht, daß zu betrügerischen Zwecken volle Wagen zurückgenommen werden.

71. Strömungsmesser für große Mengen. Besondere Arten von Messern, die untereinander eine gewisse Ähnlichkeit haben, werden in den Fällen verwendet, wo so große Mengen zu messen sind, daß die üblichen Wassermesser, Luftmesser und Gasmesser nicht wohl mehr in genügender Größe zu beschaffen sind. Man sucht dann aus dem Strom selbst zu erkennen, welche Menge er führt.

So ergibt die Venturi-Einschnürung (§ 63) jederzeit durch die Druckverminderung ein Maß der durchgehenden Menge; der sogleich zu besprechende Thomas-Messer nutzt die Erwärmung der Strömung zu gleichem Zweck aus.

Die Schwierigkeit pflegt dabei die *Integrierung der Menge nach der Zeit* zu sein.

Diese Integrierung in Fällen, wo eigentlich der augenblickliche Fluß von der Meßeinrichtung angezeigt wird, kann recht allgemein auf mehrere Arten bewirkt werden, die in ähnlicher Form an verschiedenen Instrumenten wiederkehren. Eine erste ist bereits durch Fig. 142 erläutert. Sie besteht darin, daß ein durch eine äußere Kraft in bestimmten Zeitabständen *mechanisch betätigter Hebel* so weit geht, bis er einen Anschlag trifft, und daß man nun die Stellung des Anschlages durch die Stärke des Flusses beeinflussen läßt. Diese Anordnung ist, ebenso wie bei der kontinuierlichen Wägung der über ein Förderband gehenden Mengen, Fig. 142, auch verwendet worden, um aus den zwischen Einlauf und Einschnürung eines Venturirohres sich bildenden Druckdifferenzen durch mechanisches Integrieren in bestimmten Zeitabständen indirekt die gesamte durchgegangene Menge zu messen und auf ein Zählwerk zu übertragen. (Ausführung der Builders Iron-Foundry, Providence Rh. I.)

Inzwischen hat sich eine viel bequemere Art, die durch ein Venturirohr gehenden Wassermengen zu integrieren, dadurch ergeben, daß man einen kleinen *Partialwassermesser* in eine Verbindungsleitung des Zulaufs mit der Einschnürung bringt, Fig. 125. Da der Druckverlust zwischen beiden Stellen des Venturirohres mit dem Quadrat der Wassermenge, geht, Formel (11), Seite 161, und da andererseits auch die durch einen der üblichen Wassermesser gehende Menge zu dem durch den Messer verursachten Druckverlust in quadratischer Beziehung steht, Fig. 126, Seite 166, so wird Proportionalität eintreten zwischen der durch das Venturirohr insgesamt gehenden Menge und dem durch den Wassermesser gehenden Bruchteil. Aus letzterer Angabe braucht also nur mit der Konstante der Wassermesserverbindung multipliziert zu werden, beziehungsweise es braucht nur die Skala des Wassermessers entsprechend verändert zu werden, um unmittelbar die durchgegangene Gesamtmenge abzulesen.

Eine andere Methode, die vielfach brauchbar ist, eine Integrierung der Menge vorzunehmen, besteht im Anbau einer Art *Planimeterrad*, welches nach der Zeit als Veränderlicher die Integrierung bewirkt. Ein Beispiel hierfür wird später bei dem Gehre-Dampfmesser Fig. 149 gegeben werden; auf ähnlichem Prinzip beruht auch der Arbeitszähler, § 96, der jedoch die Integrierung nach dem Wege vornimmt.

Zu den Methoden, auf indirektem Wege und nicht durch direkte Messung die Menge festzustellen, gehört auch die schon in § 49 erwähnte Anwendung der *Mischungsregel* auf die Messung.

Auf einem ähnlichen Grundsatz beruht der *Thomas-Messer*, der in neuerer Zeit für die Messung großer Gasmengen verwendet wird, z. B. als Hauptmesser in Gasanstalten. Der eigentlichen Messung dient

beim Thomas-Messer der in Fig. 144 schematisch dargestellte Teil. Der zu messenden Gasmenge wird durch einen Widerstand durch elektrische Erwärmung eine gewisse Energie zugeführt, die zu einer Temperaturerhöhung führt. Mißt man die Temperaturerhöhung mit Hilfe der Widerstandsthermometer t_1 und t_2, kennt man außerdem die zugeführte Energie, so läßt sich die Gasmenge jederzeit berechnen — vorausgesetzt allerdings, daß man ihre Qualität und daher ihre spezifische Wärme kennt.

Zur kontinuierlichen Integrierung gelangt man beim Thomas-Messer mit Hilfe einer nicht gerade einfachen Einrichtung, die in folgender Weise wirkt: Der Temperaturunterschied zwischen den Widerstandsthermometern t_1 und t_2 wird unter Zuhilfenahme eines Elektro-Servomotor zur Schaltung von Widerständen ausgenutzt. Es wird dabei erstrebt, den Unterschied $t_2 - t_1$ konstant zu halten. Steigt er über den Sollwert, so wird Widerstand ein-, also Strom abgeschaltet, sinkt der Temperaturunterschied unter den Sollwert, so erfolgt durch den

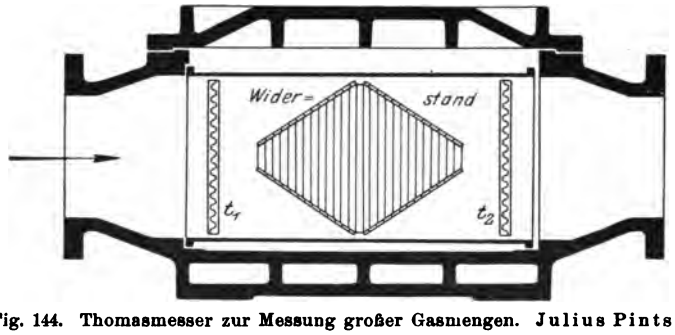


Fig. 144. Thomasmesser zur Messung großer Gasmengen. Julius Pintsch.

Motor das umgekehrte. Die dazu erforderlichen Einrichtungen gleichen einigermaßen den bekannten Kontakt-Voltmetern und Zellenschaltern, die in Verbindung mit Akkumulatorenbatterien verwendet zu werden pflegen und die dort auf konstante Spannung regulieren. Die beiden Widerstandsthermometer sind in den Zweigen einer Wheatstoneschen Brücke gegeneinander geschaltet.

Gelingt es, mit Hilfe solcher Einrichtungen die Erwärmung konstant zu halten, so besteht einfache Proportionalität zwischen dem durchgegangenen Gasgewicht und der verbrauchten Energie. Letztere zu messen, genügt aber einer der bekannten Wattstundenzähler.

Die immerhin umständliche Schalteinrichtung soll hier nicht abgebildet werden. Es wird im Einzelfall zu erwägen sein, ob in Gaswerken der Einbau einer großen Gasuhr oder der des Thomas-Messers vorzuziehen ist, und es wird die Entscheidung um so eher zugunsten des Thomas-Messers ausfallen müssen je größer die zu messenden Mengen sind. Denn die Schalteinrichtung des Thomas-Messers kann, unabhängig von der zu messenden Menge, stets die gleiche sein, nur die in Fig. 144 abgebildete Erwärmungsvorrichtung ist in die Gasleitung einzuschal-

ten, und nur ihre Größe ändert sich mit der Weite der Gasleitung. Bei großen Gasleitungen entstehen daher wohl Ersparnisse aus der Verwendung des Thomas-Messers.

Grundsätzlich ist noch anzuführen, daß der Thomas-Messer das Gewicht feststellt, die Gasuhr das Volumen des durchgegangenen Gases mißt. Die Messung des Gewichts aber ist erwünscht in allen Fällen, wo der Druck schwanken kann und wo daher die gelieferte Menge, d. h. der insgesamt gelieferte Heizwert, nicht durch das Volumen genau gekennzeichnet ist. Das ist beispielsweise in hohem Maße der Fall in Gasfernleitungen, die mit beträchtlichen Druckverlusten und daher Druckschwankungen betrieben werden.

Ähnliches gilt aber auch für die gewöhnliche städtische Gasversorgung mit Rücksicht auf den wechselnden Barometerstand und mit Rücksicht auf die Höhenlage verschiedener Orte. Aus gegebenem Kohlegewicht bestimmter Qualität wird ein bestimmtes Gewicht an Leuchtgas erzeugt werden können, das erzeugte Volumen aber wird noch vom Druck abhängen. Bei niedrigem Barometerstand wird daher ein entsprechend größeres Volumen erzeugt werden. Sofern man also nicht bei der Kontrolle der Fabrikation durch die Gasuhr den Barometerstand jeweils berücksichtigt, so wird der Thomas-Messer eine bessere Kontrolle ergeben. Auch könnte man sich dadurch helfen, daß man für die Betriebskontrolle einerseits das Volumen mittels der Gasuhr, andererseits den jeweiligen Heizwert eines Kubikmeters im nicht auf 760 mm BSt reduzierten Zustande in Betracht zieht, worauf sich die Unregelmäßigkeit heraushebt. Immerhin bleibt bestehen, daß der Thomas-Messer das gleiche automatisch erreicht.

72. Dampfmesser. In vielen Betrieben ist es wünschenswert, den augenblicklichen Dampfverbrauch eines Apparates jederzeit erkennen zu können, ohne einen längeren Versuch machen zu müssen, und weiterhin auch die in längerer Zeit insgesamt verbrauchte Dampfmenge jederzeit ablesen zu können. Ein Bedürfnis nach Dampfmessern, die den Wasser- und Gasmessern analog arbeiten, liegt namentlich in chemischen Betrieben vor, wo Dampf zu Kochzwecken benutzt wird und sich oft mit den zu kochenden Substanzen mischt, so daß man seine Menge durch Auffangen des Kondensates nicht mehr finden kann; wenn in Städten oder Gebäuden Dampfzentralen bestehen, die Dampf für Arbeits- und Heizzwecke an Verbraucher abgeben, so wünscht man ebenfalls den Verbrauch jeder Anschlußstelle messen zu können.

Bedarf nach Dampfmessern liegt also vor. Praktisch verwirklicht sind für die Dampfmessung bisher nur gewisse Formen von Strömungsmessern. Weder Kolben- noch Geschwindigkeits- noch Kapselmesser sind in für Dampf brauchbarer Form bisher am Markt zu haben. Die hohen und wechselnden Temperaturen und Drucke des Dampfes und die Kondensationsverluste bei oberflächlicher Abkühlung bilden die Schwierigkeit. Die Strömungsmesser aber haben, wie eben erläutert wurde, den Nachteil, nur den augenblicklichen Fluß anzuzeigen, nicht aber eine Integrierung nach der Zeit zu bewirken. Diese muß erst durch besondere Einrichtungen bewirkt werden.

Man begnügt sich daher oft damit, die sekundlich durchströmenden Dampfmengen an einer Skala ablesen zu können, und läßt sie außerdem gerne auf einem durch Uhrwerk bewegten Papierblatt in Gestalt eines Diagrammes abhängig von der Zeit aufschreiben. Durch Planimetrieren der unter der Kurve liegenden Fläche erhält man die insgesamt im Verlauf des betreffenden Tages durchgegangene Dampfmenge, vorausgesetzt, daß die Ausschläge des Schreibstiftes den durchgehenden Dampfmengen proportional sind, vorausgesetzt also, daß die Skala der Dampfmengen eine gleichmäßige geteilte ist; sonst sind die Diagramme nicht planimetrierbar, wenigstens erst nach einer zeitraubenden Umzeichnung. — Das Planimetrieren hat vor der einfachen Ablesung eines selbst intregrierenden Instrumentes den Nachteil der Umständlichkeit; andererseits ist der Vorteil nicht zu unterschätzen, der für Dampfbetriebe darin liegt, daß man außer dem gesamten Dampfverbrauch auch noch die Verteilung desselben auf die Tageszeiten kennt.

Auch für die Dampfmessung gilt die Beziehung (4) und (5) der Seite 142, wonach die durch den verengten Querschnitt von der Fläche f qm gehende Dampfmenge, ein spezifisches Gewicht γ kg/cbm und einen Ausflußkoeffizienten k vorausgesetzt, aus dem Druckverlust $(p_1 - p_2)$ kg/qm bestimmbar ist nach dem Ausdruck

$$V = k \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} \text{ cbm/sek}$$

oder

$$G = k \cdot f \cdot \sqrt{2g\gamma \cdot (p_1 - p_2)} \text{ kg/sek.}$$

Die Ausflußzahl ist nach Bendemann zu setzen $k = 0{,}93$, solange der Druckverlust klein ist, $p_1 - p_2 < 0{,}07\ p_1$. Meist will man das stündliche Dampfgewicht haben, dann wäre also

$$\left.\begin{aligned} G &\sim 0{,}93 \cdot 3600 \cdot \sqrt{2g} \cdot F \cdot \sqrt{\gamma_1}\ \sqrt{p_1 - p_2} \\ &= 14\,800 \cdot F \cdot \sqrt{\gamma_1} \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \text{ kg/st}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (12)$$

Da für gesättigten Dampf das spezifische Gewicht ziemlich dem Druck proportional ist, so kann man auch das Gewicht dem Ausdruck $F \cdot \sqrt{p_1} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$ proportional setzen. Für überhitzten Dampf muß man auch noch die Temperatur messen.

Solange es sich, etwa im Betriebe eines Kessels, um fast konstanten Druck handelt, so daß man für γ ohne weiteres einen aus den Dampftabellen zu entnehmenden Mittelwert einführen kann, ist $F \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$ ein Maßstab für die durchgehende Dampfmenge, und man kann entweder den Dampf durch eine in die Rohrleitung eingebaute Mündung von konstantem F gehen lassen und $p_1 - p_2$ messen (Mündungsdampfmesser) oder aber den Druckunterschied $p_1 - p_2$ durch die konstante Belastung eines Durchströmventiles konstant halten lassen und messen, eine wie große Öffnung F sich an dem Ventil einstellt (Schwimmerdampfmesser).

Einen *Schwimmerdampfmesser* zeigt Fig. 145. Der Dampf durchströmt, von unten links kommend, eine Art Wasserabscheider und muß

dann durch einen konisch erweiterten Trichter in die untere Kammer des Messers treten, von der aus er wagerecht weiterströmt. Eine kreisrunde Scheibe ist in jenem Trichter senkrecht verschiebbar so angebracht, daß man ihre Stellung von außen an einem Zeiger erkennen kann. Ein Gegengewicht zieht die Scheibe, den Schwimmer, mit konstanter Kraft nach oben. Die Scheibe stellt sich um so tiefer ein, je mehr Dampf durch den Messer geht, eine je größere Öffnung also nötig ist, um die Druckdifferenz nicht über die der Belastung des Schwimmers entsprechende wachsen zu lassen. Bei Anwendung einer geradlinigen Begrenzung für den Trichter würde keine Proportionalität zwischen Schwimmerstellung und Dampfvolumen eintreten; deshalb wird der Trichter, wie ersichtlich, leicht ausgebaucht, nach solchem Gesetz, daß gleichen Wegen des Schwimmers gleiche Vergrößerungen des Durchtrittsquerschnittes entsprechen. Ein Schreibstift aus Silber schreibt Striche auf präpariertem Papier, auf einer Trommel, die sich in 24 oder in 12 Stunden einmal um ihre Achse dreht. So erhält man die durch den Messer gehenden Dampfvolumina abhängig von der Zeit aufgetragen und kann durch Planimetrieren der Fläche das gesamte Dampfvolumen finden.

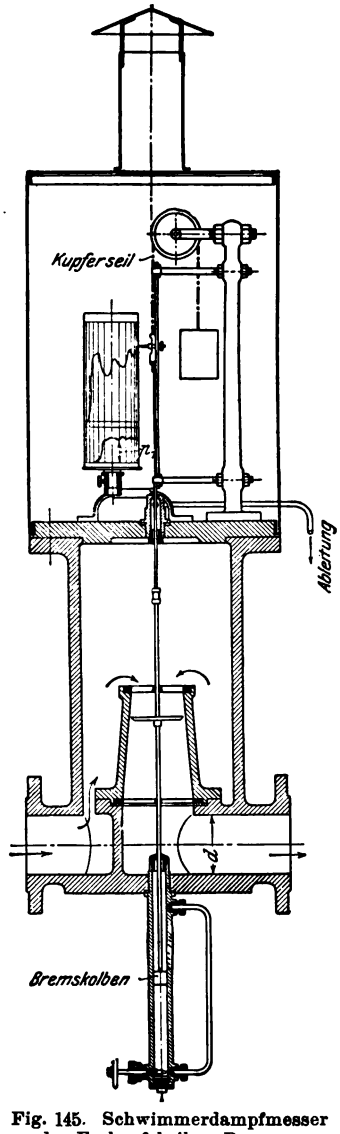


Fig. 145. Schwimmerdampfmesser der Farbenfabriken Bayer.

Hat eine Kesselanlage stets den gleichen Betriebsdruck, so kann die Skala des Papierstreifens auch ohne weiteres nach Kilogramm pro Stunde geteilt werden. Wo aber der Druck wechselt, da ist der Ausschlag des Schreibstiftes, wie wir wissen, noch proportional $\sqrt{\gamma}$, also auch annähernd proportional $\sqrt{p}$. Nun ist noch ein registrierendes Federmanometer gewöhnlicher Bauart so angebaut, daß es auf dem gleichen Papierblatt die Drucke p_1 unterhalb der Dampfvolumina aufschreibt. Man kann also, nach Augenmaß oder durch Planimetrieren, den mittleren Druck während des Tages finden und dann das gesamte Dampfgewicht aus einer Tabelle entnehmen, die dem Messer beigegeben wird und die im wesentlichen die aus Formel (12) folgenden Werte gleich fertig gebildet enthält. Daß es nicht

korrekt ist, erst den mittleren Druck und aus ihm die Wurzel zu bilden — daß man vielmehr erst die Wurzel aus den jeweiligen Werten des Druckes ziehen und aus den Wurzeln den Mittelwert bilden sollte, wissen wir von S. 24. Bei größeren Schwankungen des Druckes kann das Verfahren erhebliche Fehler bringen, und man müßte zu einer umständlicheren Auswertung, etwa stundenweise, schreiten.

Die Notwendigkeit einer Stopfbüchse bei Schwimmermessern ist an sich unerwünscht; allerdings stehen, wegen der erheblichen Fläche des Schwimmers, die ja etwa gleich der der Dampfleitung wird sein müssen, ziemlich große Kräfte für die Bewegung des Schreibstiftes zur Verfügung. Soll die Stopfbüchse nicht zu scharf angezogen sein, so wird sich hindurchtretender Dampf in ihr niederschlagen; dazu das Ableitungsrohr. Um außerdem nach Bedarf das Pendeln des Schreibstiftes mindern zu können, ist ein Bremskolben — eine Wasserdämpfung — angebracht.

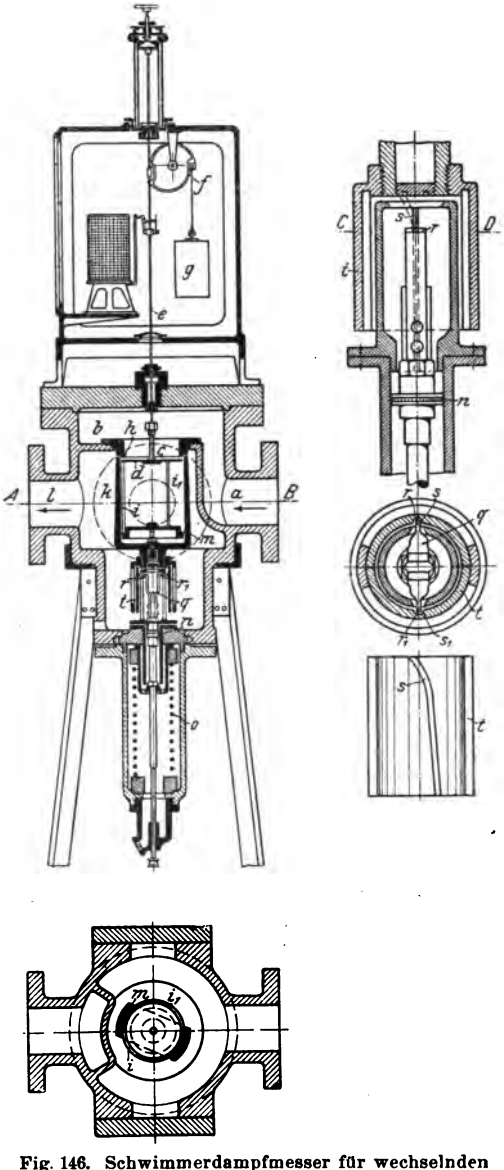


Fig. 146. Schwimmerdampfmesser für wechselnden Dampfdruck. Chemische Fabrik Rhenania.

Der Schwimmermesser Fig. 146 nimmt auch bei wechselndem Dampfdruck auf diesen Rücksicht. Der Schwimmer *cd* bewegt sich in einem zylindrischen Rohr *i i*, in das der Dampf wieder von oben eintritt, den Schwimmer niederdrükkend. Je weiter er niedergeht, desto größere — der Entlastung wegen symmetrisch angeordnete — Öffnungen werden dem Dampfe freigegeben. Nun wird aber die Breite der dem Dampf-

durchgang verfügbaren Schlitze von einer ringförmigen Kulisse m beeinflußt, die das Schwimmerrohr umgibt. Die Ringkulisse dreht sich dem Druck entsprechend; dazu wird Kolben n dem Druck entsprechend niedergedrückt, und die mit ihm verbundene Gabel $q\,r$ greift in eine Kurvennut im Teil t ein, der mit der Kulisse m verbunden ist, so daß die niedergehende Bewegung in eine drehende verwandelt wird. Die von der Kulisse freigegebene Spaltbreite b muß umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Druck sein: $b = \frac{c_1}{\sqrt{p_1}}$; und das Moment des belastenden Gewichtes sollte konstant sein, so daß $\sqrt{p_1 - p_2} = c_2$ unabhängig von h wäre. Dann würde das Dampfgewicht

$$G = c \cdot F \cdot \sqrt{p_1} \cdot \sqrt{p_1 - p_2} = c \cdot b\,h \cdot \frac{c_1}{b} \cdot c_2 = C \cdot h$$

einfach proportional dem Hube h des Schwimmers, wie erwünscht. Die in der Figur zu erkennende Aufhängung des Belastungsgewichtes an einer Kurvenscheibe trägt also nur dem Umstande Rechnung, daß bei seitlichem Abgang des Dampfes die Belastung des Tellers nicht mehr dem Druckunterschied proportional bleibt.

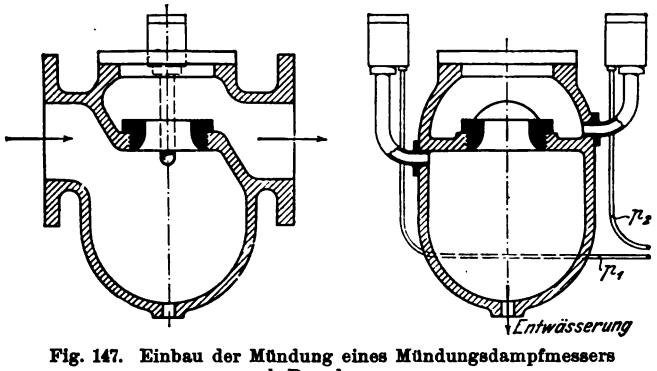


Fig. 147. Einbau der Mündung eines Mündungsdampfmessers nach Bendemann.

Mündungsdampfmesser beruhen auf der Verwendung einer Drosselscheibe; der Druckunterschied zu ihren beiden Seiten ist ein Maßstab für die durchgehende Dampfmenge. Man hat also nur ein Differentialmanometer anzuschließen, um die augenblickliche Dampfmenge ablesen zu können; handelt es sich nur um das Ablesen, so tut es ein U-Rohr mit Quecksilberfüllung. Zweckmäßig ist es, wie beim Schwimmerdampfmesser so auch beim Mündungsdampfmesser für Entwässerung des Dampfes vor der Mündung zu sorgen. Außerdem können Wassersäulen, die in den Zuführungen zum Differentialmanometer durch Kondensation sich ausbilden, störend wirken — bei der Messung eines Druckunterschiedes noch mehr als bei der Messung von Drucken. Deshalb kann man die Mündung nach Fig. 147 in eine Art Wasserabscheider einbauen und muß die Zuleitungen zunächst nach Wasservorratsbehältern mit Überlauf führen, die in Fig. 147 auch zu erkennen sind und deren innerer Bau aus Fig. 52, S. 69 hervorgeht; an letzterer Stelle ist der Einfluß von Wassersäulen, dessen Beachtung auch für Druckmessungen wichtig ist, genauer besprochen.

Um größere Druckunterschiede zwischen den beiden Meßstellen zu erhalten und dadurch die Messung genauer zu machen, oder aber mit weniger subtilen Anzeigeinstrumenten auszukommen, ist bei dem Dampfmesser Fig. 148 die Messung von p_2 in eine recht eng (unter Beachtung des vom Meßrohr fortgenommenen Raums auf rund $^1/_{250}$ des Rohrquerschnitts) eingezogene Düse verlegt, die nachher aber erweitert ist, um dadurch einen Teil der Geschwindigkeitshöhe wieder in Druck umzusetzen — ähnlich wie das beim Venturi-Wassermesser gemacht wird. Die Entnahme der beiden Drucke geschieht in der Achse des Dampfstromes durch Kupferröhrchen, die schräg von vorn und von hinten zur Achse geführt sind, und von denen eines dem Dampfstrom entgegen, das andere in seine Richtung gebogen, jedes aber mit seitlichen Druckentnahmelöchern versehen ist. Vor den Messer wird im allgemeinen ein Wasserabscheider gesetzt. Der Dampf durchströmt den Messer in der Fig. 148 von rechts nach links. Dann ist die Gestaltung der Düse theoretisch nicht gerade zu billigen. Der Wiedergewinn an Geschwindigkeitshöhe würde vollkommener sein, wenn lieber die Verengung des Querschnittes plötzlich, die Erweiterung aber allmählich vor sich gehe, umgekehrt wie es in Fig. 148 geschieht. Trotzdem werden — nach Angabe des Fabrikanten — etwa 65% des bis zur Düsenmeßstelle entstandenen Druckabfalles $p_1 - p'$ hinter der Düse zurückgewonnen, so daß beispielsweise für die Dampfmessung Druckunterschiede von 0,67 oder von 1,35 at zur Verfügung standen, während doch der Spannungsverlust insgesamt nur 0,23 oder 0,50 at betrug. — Als Anzeiger zu dem Dampfmesser Fig. 148 kann ein Differentialmanometer nach Fig. 50 verwendet werden oder nach Bedarf registrierende Instrumente, um durch Planimetrieren die Dampfmenge zu finden. Bei schwankendem Dampfdruck p_1 wird auch dessen mittlerer Wert durch Registrieren zu finden sein.

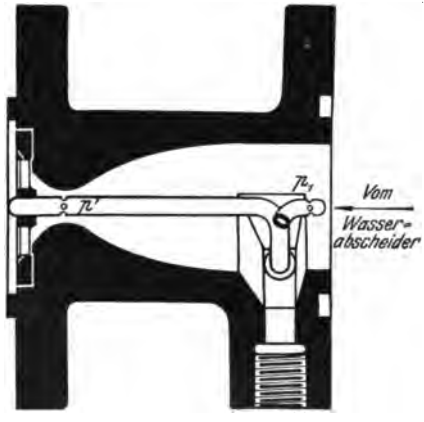


Fig. 148. Düseneinrichtung des Dampfmessers von Eckardt. Hierzu das Differentialmanometer Fig. 50.

Um bei wechselnden Drucken immer gleich das Dampfgewicht ablesen zu können, hat man eine Reihe von Skalen angeordnet, jede für einen Druck gültig, und bringt dann vor der Ablesung die für den jeweiligen Druck gültige an; die Skalen können etwa auf einer drehbaren Trommel befestigt sein.

Nun sind aber diese Apparate nicht eigentlich Dampfmesser, sondern nur *Dampfzeiger*; sie geben, wenn mit einem registrierenden Differentialmanometer versehen, nicht einmal planimetrierbare Diagramme, geschweige denn, daß sie selbst die durchgehenden Mengen zusammen-

zählten. Auch ohnedies können sie schon wertvoll sein; zum Beispiel machen sie es dem Heizer möglich, das Feuer nach der Dampfentnahme zu regeln und daher Druckschwankungen fast zu vermeiden, während er ohne einen Dampfzeiger erst nach dem Eintreten der Druckschwankung seine Maßregeln treffen kann. — Um aber mit Hilfe der einfachen Mündung einen eigentlichen Dampfmesser zu erhalten, ist es nötig, ein Differentialmanometer zu haben, dessen Ausschläge proportional der Wurzel aus dem Druckunterschied und also proportional dem durch die Mündung strömenden Dampfvolumen sind. Erst dann ergibt der Mündungsmesser planimetrierbare Diagramme. Man hat von einer Quecksilbersäule Kontakte schließen lassen, die nicht in gleichmäßigem Abstand, sondern den Wurzelwerten entsprechend in das Glasrohr eingeschmolzen waren. Eine Reihe Stifte schreibt nun auf einem Papierblatt Striche in gleichem Abstand, doch immer nur diejenigen sind angedrückt, deren Elektromagnet durch die ersterwähnten Kontakte erregt ist. So entsteht eine Linienschar, die von weitem den Eindruck einer schraffierten Figur macht; die Umrisse der Figur kann man planimetrieren. Die Anordnung macht zwar einen umständlichen Eindruck, wird aber sehr zuverlässig arbeiten können.

Eine andere Lösung der Aufgabe rührt von Gehre her, der überhaupt als Konstrukteur von Dampfmessern in erster Reihe zu nennen ist. Zugleich möge der Gehresche Dampfmesser als Beispiel dafür angeführt sein, wie man zwei weitere Aufgaben des Dampfmesserbaues zu lösen versuchen kann: erstens die selbsttätige Zusammenzählung der durchgegangenen Dampfmengen; dazu verwendet Gehre gewissermaßen ein selbsttätiges Planimeter; zweitens die selbsttätige Berücksichtigung wechselnden Dampfdruckes, was bei Gehre durch ein Getriebe geschieht, das ohne weiteres die Produkte $\sqrt{p_1} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$ durch eine kinematische Anordnung bildet. Beide Einrichtungen wären auch bei anderen Mündungsmessern und auch bei Schwimmermessern verwendbar, nur wäre bei Schwimmermessern nach Fig. 145 das Produkt $\sqrt{p} \cdot F$ kinematisch zu bilden.

Fig. 149 zeigt den *Gehreschen Mündungsdampfmesser*. Vor und hinter einem Drosselflansch wird der Druck entnommen; die beiden Meßrohre werden zunächst ein Stück wagerecht geführt, um die Störungen durch wechselnde Wassersäulen zu vermeiden (siehe oben und S. 69), und gehen dann zu den Gefäßen A und C eines Quecksilbermanometers eigentümlicher Bauart, das den Druckunterschied mißt. Bei diesem Manomter ABC befindet sich nämlich der eine Quecksilberspiegel in einem festen, der andere in einem beweglichen, mit dem festen durch eine Drehstopfbüchse verbundenen Gefäß; das bewegliche Gefäß B bildet also einen drehbaren Arm, der an einer Schraubenfeder hängt. Läßt nun der zu messende Druckunterschied Quecksilber in das bewegliche Gefäß treten, so sinkt dies herab; dadurch tritt mehr Quecksilber über, es sinkt weiter, und so fort; durch Bemessung der Feder und ihres Angriffsarmes hat man es in der Hand, ob die Einrichtung überhaupt statisch wird und wie groß der Ausschlag zu einem relativ kleinen Druckunterschied wird; dabei werden relativ große Kräfte zur

Überwindung der Stopfbüchsenreibung frei, und vor allem: man kann durch Verwendung eines wie ersichtlich nicht zylindrischen Gefäßes, dessen Gestalt man nach jedem beliebigen Gesetz bilden kann, jede gewünschte Beziehung zwischen Druckdifferenz und Ausschlag herbeiführen. Soll der Ausschlag in unserem Fall proportional $\sqrt{p_1 - p_2}$ sein, so muß das Gefäß B nach oben verjüngt sein und eine etwas eingezogene Mantellinie erhalten. — Oberhalb des Quecksilbers wird stets Wasser stehen, das sich aus Dampf gebildet hat wegen der Abkühlungsverluste, oder vielmehr um diese Bildung zu vermeiden, füllt man den Raum oberhalb des Quecksilbers gleich mit Wasser. Das obere Ende des beweglichen Gefäßes B muß also durch eine zweite Drehstopfbüchse zu dem Gefäß C zurückgeführt werden. Die Ausschläge des Manometers, die nun bei konstantem Druck direkt Dampfmengen bedeuten, werden auf einer Trommel registriert, und das entstehende Diagramm kann planimetriert werden; daß die Ordinaten Kreisbögen sind, stört hierfür nicht. — Gegen die Drehstopfbüchse, die gegen Quecksilber und noch dazu unter hohem Druck abzudichten hat, werden sich reichlich die Bedenken erheben lassen, wie gegen die Spindelstopfbüchse der Fig. 145.

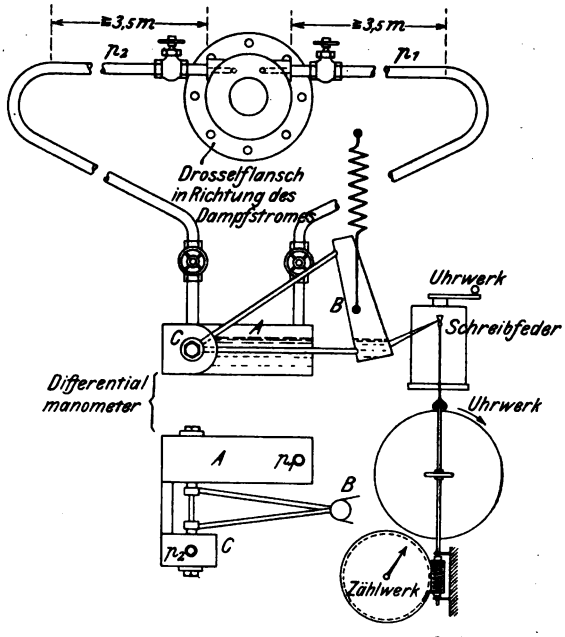


Fig. 149. Mündungsdampfmesser von Gehre.

Um den Messer integrierend zu machen, ist mit dem Gefäß B ein Zählwerk wie folgt verbunden. Eine ebene runde Scheibe wird durch ein Uhrwerk gleichmäßig gedreht; auf ihr rollt ein Rädchen, ähnlich dem eines Planimeters, und dieses wird von dem Manometer verschoben. Bei Nullstellung des Manometers steht das Rädchen auf der Scheibenmitte und rollt also nicht ab; bei jedem Ausschlag erfährt es eine Abrollung, die einerseits proportional der Zeit und andererseits proportional der jeweiligen Dampfmenge ist; insgesamt ist die Abrollung also ein Maß des durchgegangenen Dampfvolumens. Die Abrollung betätigt ein Zählwerk; dieses kann feststehen, da die Schnecke auf ihrer Achse verschiebbar ist.

Für konstanten Druck ist damit alles Gewünschte erreicht. Soll

der Dampfmesser bei wechselnden Drucken gebraucht werden, so verwendet Gehre das in Fig. 150 skizzierte Getriebe. Der Schreibhebel SAB ist bei A drehbar gelagert, während B durch das eben besprochene Manometer, dessen Achse bei C gedacht ist, proportional zu $\sqrt{p_1 - p_2}$ verstellt wird. Der Schreibstift S schreibt das Diagramm. Nun ist aber der Drehpunkt A nicht fest, sondern wird durch eine Kulisse DE in einer Gleitbahn FG verschoben; da bei K eine Art Indikatorkolben die Verstellung proportional p_1 bewirkt, so geht die Kulisse bei steigendem Druck abwärts, die Übersetzung des Hebels SAB vergrößert sich, und es wird eine größere Angabe registriert als bei kleinem Druck. Daß die Angabe gerade mit der Wurzel aus p_1 wachse, kann man durch Gestaltung der Kulisse erreichen; damit für $p_1 - p_2 = 0$ auf alle Fälle die Angabe Null eintritt, gleichgültig wie hoch der Druck ist, ist die Gleitbahn FG in die Richtung H-Null gelegt. — Das Getriebe arbeitet nicht mathematisch genau; das erkennt man schon daraus, daß der Radius der Bogenordinaten ein wechselnder ist, so daß zeitliche Ver-

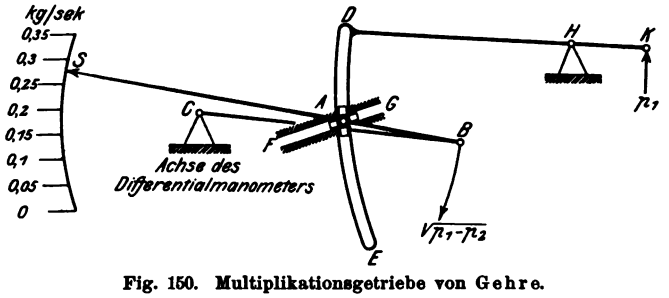


Fig. 150. Multiplikationsgetriebe von Gehre.

schiebungen auftreten müssen; auch wird die Gestalt der Kulisse sich nicht bei allen Werten von $\sqrt{p_1 - p_2}$ gleich ergeben; man muß also vermitteln, was auch innerhalb gewisser Grenzen genügt. Im übrigen ist das Getriebe zweifellos sinnreich und auch praktisch gut: für die Verstellung der Kulisse sind leicht genügende Kräfte freizumachen; für die Rückwirkung auf die Druckdifferenzangabe, wo geringere Verstellkräfte vorhanden sind, fehlt der Hebelarm. — Die Angabe des Schreibstiftes S kann man natürlich wieder durch eine Vorrichtung nach Fig. 149 selbsttätig integrieren lassen. Bei überhitztem Dampf zeigt solch Multiplikationsgetriebe nicht das Dampfgewicht an, sondern macht eine zu hohe Angabe, weil das spezifische Gewicht des überhitzten Dampfes geringer, also das durchgegangene Volumen größer ist, als gesättigtem Dampf entspricht. Es pflegt den Apparaten eine Tabelle beigegeben zu werden, die die den verschiedenen Überhitzungen entsprechende Berichtigung in Prozenten angibt; bei wechselnden Drucken und wechselnden Temperaturen kann es sich hierbei natürlich nur um eine Annäherung handeln; die Berichtigung selbst beträgt je nach der Überhitzung 10 bis 20% und mehr, darf also nicht vernachlässigt werden. — Jedes Multiplikationsgetriebe gewährt den Vorteil, daß man

die aus dem Rechnen mit Mittelwerten herrührenden Fehler vermeidet; ob dieser Vorteil nicht durch die im Getriebe liegenden Fehler, insbesondere Reibung, wettgemacht wird, bleibe dahingestellt.

Die Rücksichtnahme auf wechselnden Druck bringt stets eine erhebliche Komplikation in den Dampfmesser, wie die Lösungen Fig. 146 und 150 zeigen. Man sollte deshalb tunlichst von den Dampfmessern für konstanten Druck Gebrauch machen und wird dann finden, daß diese einfacheren Instrumente praktischen Zwecken meist genügen. Nur muß der *Einbau* entsprechend sein: dicht am Kessel, dessen Druck leidlich konstant zu sein pflegt, nicht ans Ende einer langen Rohrleitung, wenn dieselbe großen und dann wechselnden Spannungsabfall hat; auch nicht hinter ein Reduzierventil, das doch immer unregelmäßig arbeitet, sondern vor dasselbe setze man den Dampfmesser.

Der Dampfmesserbau ist erst in der Entwicklung, jedoch in schneller, da ein großer Bedarf vorhanden ist, namentlich wie erwähnt in der chemischen Industrie, aber auch anderwärts. Für die Aussichten der beschriebenen beiden Hauptformen — Schwimmer- und Mündungsmesser — ist noch zu erwähnen, daß bei Schwimmermessern das ganze Messergehäuse an die Rohrleitung anzupassen ist, während die Mündungsmesser nur den Einbau der Mündung in der Leitung erfordern. Die wesentlichen Teile der Mündungsmesser — das Differentialmanometer — sind daher für alle Fälle die gleichen, und können im großen hergestellt, auch leicht für jede andere Rohrleitung verwendet werden. Dem steht als Nachteil die komplizierte Bauart und die geringe Verstellkraft der Differentialmanometer gegenüber, die nur einen verhältnismäßig geringen Schreibstifthub gestattet und daher weniger genaue Diagramme liefert — von der Überwindung der durch ein Zählwerk bedingten Widerstände ganz zu schweigen; außerdem wurde schon die Schwierigkeit erwähnt, kleine Dampfmengen noch befriedigend genau zu messen, wenn man nicht für die Höchstdampfmenge allzuhohe Druckverluste zulassen will. — Trotz mancher noch vorhandener Mängel und Schwierigkeiten ist doch die Einführung von Dampfmessern zur Betriebskontrolle ein gewaltiger Fortschritt.

IX. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

73. Übersicht. Eine *Kraft* erkennt und mißt man an den Wirkungen, die sie auf irgendwelchen Körper — Maschinen- oder Bauteil — hervorbringt. Diese Wirkungen können dreierlei Art sein, je nachdem es sich um einen ruhenden Körper handelt (Gleichgewichtszustand), oder ob es sich um einen gleichförmig oder um einen ungleichförmig bewegten Körper handelt (Beharrungszustand, Beschleunigung oder Verzögerung).

Eine Kraft kann dadurch kenntlich werden, daß sie die von einer oder mehreren anderen Kräften erstrebte Bewegung verhindert, sie ist

dann mit diesen Kräften im *Gleichgewicht*. Kennt man die andere Kraft, so kann man sie nach den Lehren des Gleichgewichts zur Messung der ersten benutzen. Die Wage, die wir als Mittel zur Mengenmessung besprochen haben, ist eigentlich ein Kraftmesser. Die Schalenwage vergleicht irgendeine Kraft mit der Schwerkraft des ausgleichenden Gewichtsstückes, die man kennt; die Federwage vergleicht eine beliebige Kraft mit der elastischen Kraft der Feder, die man ebenfalls (durch Eichung) kennt. Ist eine Wage nicht für Mengenmessungen, sondern speziell zur Messung von Kräften eingerichtet, so nennt man sie *Dynamometer*.

Eine Kraft kann auch dazu dienen, eine vorhandene Bewegung trotz entgegenstehender Widerstände aufrecht zu halten (*Beharrungszustand*). Sie überwindet dann die Widerstände und leistet dadurch eine *Arbeit L*, die durch das Produkt aus der Größe der Kraft P und dem Wege s ihres Angriffspunktes gegeben ist: $L = P \cdot s$. — Die in der Sekunde von einer Maschine gelieferte oder verbrauchte Arbeit nennt man ihre *Leistung*. Die Leistung ist also Kraft mal Weg in der Sekunde, also auch Kraft mal Geschwindigkeit: $N = \frac{P \cdot s}{t} = P \cdot w$. — Zur Messung einer Kraft können diese Beziehungen insofern dienen, als man aus dem Gesetz von der Erhaltung der Energie weiß, daß Arbeit unverwüstlich, aber in die verschiedensten anderen Energieformen umsetzbar ist; solche Umsetzungen erfolgen nach festen Äquivalenzverhältnissen, darauf eben beruht die Messung. Man kann also die Arbeit nicht nur in mechanischer, sondern auch in elektrischer Form oder als Wärme messen, und dann rückwärts die Kraft berechnen. In bezug auf die Leistung gelten bei solchen Umsetzungen die gleichen Äquivalenzverhältnisse, man kann also auch sie zur Ermittlung von Kräften verwenden.

Hat man etwa die elektrische Leistung eines Hebezeugmotors und die Hakengeschwindigkeit gemessen, so ergibt sich aus $P = \frac{N}{w}$ die gehobene Last, freilich noch ohne Beachtung des Wirkungsgrades. Hat man die indizierte Leistung einer Lokomotive und die Fahrgeschwindigkeit des Zuges gemessen, so gibt die gleiche Formel die am Zughaken ausgeübte Kraft, wieder ohne Beachtung des Wirkungsgrades; doch ist es gleichgültig, ob der Zug bergauf oder bergab fuhr. Häufiger freilich ermittelt man umgekehrt aus der Last und der Hakengeschwindigkeit die Leistung eines Hebezeuges, aus Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit die Leistung der Lokomotive. Der Zusammenhang bleibt aber der gleiche.

Wo es sich endlich um *Beschleunigungs- oder Verzögerungszustände* handelt, da kann man die auf einen Körper wirkende Gesamtkraft aus den allgemeinen Beschleunigungsgleichungen ermitteln. Insbesondere läßt sich die auf einen Körper von der Masse m wirkende Gesamtkraft P finden aus der Beschleunigungsgleichung $P = m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2}$ oder $P = m \cdot \frac{dw}{dt}$;

zu ihrer Feststellung ist also die Messung des zurückgelegten Weges s oder der jeweiligen Geschwindigkeit w in ihrer Abhängigkeit von der Zeit t nötig, und dann ist eine ein- oder zweimalige Differentation auszuführen.

Für die *drehende Bewegung* tritt an die Stelle der Kraft das *Drehmoment*, das ist ein Kräftepaar, dessen Größe durch das Produkt aus Kraft und Arm gegeben ist: $M_d = P \cdot l$. Geht die eine Kraft des Paares durch die Rotationsachse, wie es meist der Fall ist, so ist das von der anderen ausgeübte Drehmoment gegeben durch das Produkt aus der Kraft und dem Abstand des Angriffspunktes von der Drehachse, also wieder $M_d = P \cdot l$. Man kann das Drehmoment auch als die Kraft reduziert auf den Arm Eins definieren.

Alles, was wir über die Kraft und ihre Messung gesagt haben, gilt wörtlich vom Drehmoment, sobald es sich um eine drehende Bewegung handelt. Nur tritt die Winkelgeschwindigkeit ω oder die Tourenzahl n in der Minute an die Stelle der fortschreitenden Geschwindigkeit, der durchlaufene Winkel φ an die Stelle des Weges und das Trägheitsmoment J an die Stelle der Masse.

Auch bei drehender Bewegung kann es sich um *Gleichgewichtszustände* handeln — die von dem zu messenden Drehmoment erstrebte Bewegung kommt infolge eines entgegenstehenden gleich großen nicht zustande, wie am Balken eines Bremszaumes.

Oder es kann sich um einen *Beharrungszustand* handeln — das Schwungrad der Kraftmaschine läuft trotz des widerstehenden Drehmomentes einer Bremse, einer belastenden Dynamomaschine oder einer belastenden Transmission gleichförmig um und gibt dadurch Arbeit ab, deren Wert durch das Produkt aus der Größe des Drehmomentes M_d und dem zurückgelegten Winkel φ zu finden ist: $L = M_d \cdot \varphi$. — Die in der Sekunde gelieferte Arbeit ist wieder die Leistung der Maschine, gegeben durch die Beziehung $N = \frac{M_d \cdot \varphi}{t} = M_d \cdot \omega$. — Zur Messung des Drehmomentes können diese Beziehungen wieder auf Grund des Gesetzes von der Erhaltung der Energie dienen; schreibt man $M_d = \frac{N}{\omega}$, so kann man die Leistung N nicht nur in mechanischer Form, sondern als elektrische Leistung der angetriebenen Dynamomaschine messen, mißt außerdem mittels Tachometers die Winkelgeschwindigkeit ω und berechnet das zum Antrieb der Dynamomaschine nötige Drehmoment; der Wirkungsgrad der Dynamomaschine ist dabei freilich wieder noch unbeachtet.

Bei *Beschleunigungs- und Verzögerungszuständen* kann man das auf die umlaufenden Massen, deren Trägheitsmoment J sei, wirkende Gesamtmoment aus der Beschleunigungsgleichung finden, die für umlaufende Bewegung die Form hat $M_d = J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ oder $M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$; man hat das Trägheitsmoment, sowie den durchlaufenen Winkel oder die Geschwindigkeit zu messen und muß dann wieder die Differentiation ausführen.

74. Einheiten. Als Einheit der Kraft haben wir im technischen Maßsystem das Kilogramm [kg], eines der Grundmaße. Die Einheit des Drehmomentes ist jenes Drehmoment, wo das Kilogramm am Arme von 1 m angreift, das Meterkilogramm [m · kg]. Man benutzt auch die kleinere Einheit: 1 cm · kg $= \frac{1}{100}$ m · kg.

Die Einheit der Arbeit wäre diejenige Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Widerstand von 1 kg über 1 m hin zu überwinden, etwa ein Kilogrammgewicht ein Meter hoch zu heben. Die Einheit der Arbeit heißt daher ebenfalls Meterkilogramm [m · kg]. Benutzen wir die drehende Bewegung zur Bestimmung einer Arbeitseinheit, so kommen wir auf die gleiche: es ist diejenige Arbeit, die man aufwenden muß, will man eine Drehung um den Winkel Eins ($57° 17\frac{3}{4}'$) entgegen dem widerstehenden Drehmoment von 1 m · kg zustande bringen. Die Einheit ist also 1 mkg · 1 [m · kg], denn der Winkel ist eine unbenannte Zahl. Auf gebräuchlichere Arbeitseinheiten kommen wir unten.

Die Einheit der Leistung im technischen Maßsystem wird geliefert, wenn in jeder Sekunde die Arbeit von 1 m · kg geliefert wird. Diese Einheit $1 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}}$ ist nicht die übliche. Man rechnet im Maschinenbau nach Pferdestärken, und zwar wird definiert $1\ \text{PS} = 75 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}}$; die Pferdestärke ist 75 mal so groß wie die Einheit des technischen Maßsystems.

Bei umlaufender Bewegung ergibt sich folgende Beziehung: es werden $75 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}}$ dann geleistet, wenn ein Maschinenteil sich sekundlich um die Einheit des Winkels ($57° 17\frac{3}{4}'$) vorandreht und dabei das Drehmoment von 75 m · kg ausübt. Wenn nun meist die Winkelgeschwindigkeit in Form der minutlichen Umlaufzahl gegeben ist, so daß die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{n}{60} \cdot \frac{360°}{57° 17\frac{3}{4}'}$ ist, so entspricht einem Drehmoment M_d eine Leistung von $\frac{360°}{57° 17\frac{3}{4}' \cdot 60} \cdot M_d \cdot n$, gemessen in $\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{sek}}$, oder es ist in Pferdestärken

$$N^{\text{PS}} = \frac{360}{57{,}3 \cdot 60 \cdot 75} \cdot M_d \cdot n = \frac{M_d^{\text{m} \cdot \text{kg}} \cdot n^{\text{Uml/min}}}{716} \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die Elektrotechnik ist, vom physikalischen c. g. s-System ausgehend, auf das Watt als Leistungseinheit gekommen; die einem elektrischen Strom entsprechende Leistung ist nämlich gegeben durch das Produkt aus der Spannung zwischen dem Ein- und Austritt des Stromes in denjenigen Teil, dessen Energieaufnahme man messen will und aus der durch den betreffenden Teil gehenden Stromstärke — die Spannung zu messen in Volt, die Stromstärke in Ampere, wenn man als Produkt die Leistung in Watt erhalten will. Gebräuchlicher ist das Kilowatt: 1 KW = 1000 Watt. Bei Wechselstrom hätte man die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke einzuführen und die Phasen-

verschiebung zu berücksichtigen, bei Drehstrom auch mit $\sqrt{3}$ zu multiplizieren.

Beide Leistungseinheiten, Kilowatt und Pferdestärke, stehen in einem gewissen festen Verhältnis zueinander, das experimentell wie folgt festzustellen ist: Fließt 1 Ampere im Leiter von 1 Ohm Widerstand, also bei 1 Volt Spannungsabfall, so entstehen 0,0002387 Wärmeeinheiten in der Sekunde (kalorimetrische Messung): 1 Watt = 0,0002387 WE/sek. Natürlich darf in diesem Falle in dem Leiterteil keine sonstige Energieentnahme, durch chemische Zersetzung oder Betreiben eines Elektromotors, stattfinden. — Andererseits ist bekanntlich 1 WE = 427 m · kg, also $1\ \text{PS} = 75\,\frac{\text{m}\cdot\text{kg}}{\text{sek}} = \frac{75}{427}\,\frac{\text{WE}}{\text{sek}}$. Daraus folgt $1\ \text{PS} = \frac{75}{427 \cdot 0{,}0002387} = 735{,}8$ Watt.

$$1\ \text{PS} = 736\ \text{Watt} = 0{,}736\ \text{KW} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Das Kilowatt ist also um etwa ein Drittel größer als die Pferdestärke, diese um rund ein Viertel kleiner als das Kilowatt.

In neuester Zeit besteht die Absicht, die rechnerisch unbequeme, aus alter Zeit übernommene Pferdestärke ganz fallen zu lassen und auch für die mechanische Leistung das Kilowatt, nötigenfalls unter dem Namen Großpferd, als Einheit anzuwenden. Es ist dann

$$1\ \text{KW}\ (=1\ \text{GP}) = \frac{75}{0{,}736} = 101{,}9 \backsim 102\,\frac{\text{m}\cdot\text{kg}}{\text{sek}} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Rückwärtsgehend hat man aus diesen Leistungseinheiten durch Multiplizieren mit der Zeitdauer, während welcher die Leistung geliefert wurde, Arbeitseinheiten gebildet, die mehr gebraucht werden als das Meterkilogramm. Wird 1 PS eine Stunde lang geleistet, so ist die gelieferte Arbeit 1 PS · st; wird 1 KW eine Stunde lang geleistet, so ist die gelieferte Arbeit 1 KW · st. Es ist offenbar

$$1\ \text{PS}\cdot\text{st} = \left(75\,\frac{\text{m}\cdot\text{kg}}{\text{sek}}\right)\cdot(3600\ \text{sek}) = 75 \cdot 3600\ \text{m}\cdot\text{kg} = 270\,000\ \text{m}\cdot\text{kg} \quad (4)$$

also
$$1\ \text{KW}\cdot\text{st} = \frac{1000}{736}\cdot 270\,000 = 367\,000\ \text{m}\cdot\text{kg} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Endlich kann man noch die Wärmeeinheit als Arbeitseinheit ansehen, das ist jene Wärmemenge, die 1 kg Wasser um 1° erwärmt (§ 104). Nach den neuesten Forschungen ist 1 WE = 427 m · kg der wahrscheinlichste Wert. Daher ist wieder $1\ \text{WE} = 427 \cdot \frac{1}{270\,000} = \frac{1}{632}\ \text{PS}\cdot\text{st}$, oder, wenn wir auf Leistungseinheiten übergehen:

$$1\ \text{PS} = 632\,\frac{\text{WE}}{\text{st}};\quad 1\ \text{KW} = 873\,\frac{\text{WE}}{\text{st}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Im *englischen Maßsystem* ist die Arbeitseinheit das Fußpfund; es ist 1 m · kg = 7,233 Fußpfund. Die englische Pferdestärke (HP) ist $1\ \text{HP} = 550\,\frac{\text{Fs}\cdot\text{Pfd}}{\text{sek}}$; es ist 1 PS = 0,986 HP.

75. Dynamometer für Kraftmessung. Apparate zur direkten Messung von Kräften oder Drehmomenten heißen Dynamometer. Jede Wage ist ein Dynamometer, sie mißt die Schwerkraft von Körpern. Meist betrachtet man aber die Wage als zum Messen von Stoffmengen dienend. Dann versteht man unter Dynamometern Apparate, deren Wirkung nicht an die senkrechte Richtung der Kraft gebunden ist. Doch werden wir die Brückenwage später beim Pronyschen Zaum richtig als Kraftmesser verwendet finden.

Ein eigentliches Dynamometer ist die *Federwage*, deren Wirksamkeit zu beschreiben überflüssig ist. Bei dem Dynamometer Fig. 151 sind sanft gebogene Federn der wirksame Teil. Ihre Streckung unter dem Einfluß der Kräfte P wird, durch ein Zahnradgetriebe auf einen Zeiger übertragen und sichtbar gemacht, als Maß der Kräfte verwendet. Dies Dynamometer dient namentlich zur Messung des Widerstandes landwirtschaftlicher Maschinen, siehe S. 206.

Bei *hydraulischen Dynamometern* wirkt die zu messende Kraft auf einen Kolben und erzeugt in der Flüssigkeit unter dem Kolben eine Spannung, die ein Maß für die Größe der Kraft ist, sobald man die

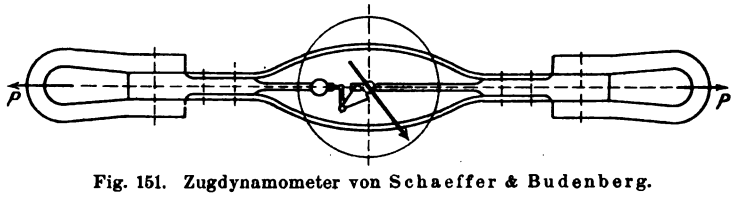


Fig. 151. Zugdynamometer von Schaeffer & Budenberg.

Kolbenfläche kennt. Das Manometer wird dann direkt in Kilogramm geteilt. Das Ganze ist eine Umkehrung der Kolbenpresse, bei der man aus der Kolbenfläche und den bekannten Gewichten die erzeugte Spannung berechnete, und die insbesondere zum Eichen von Manometern dient (S. 66). Man hat solche hydraulischen Wagen beispielsweise zum Einhängen in den Kranhaken, so daß man am Manometer, das dann gleich in Kilogramme geteilt wird, nicht in Atmosphären, die gehobene Last ablesen kann.

Höheren Ansprüchen an Genauigkeit entspricht die *Meßdose* (Fig. 152). Auch sie ist ein hydraulischer Kraftmesser. Die Flüssigkeit ist in einen Hohlraum eingeschlossen, der nach oben zu durch eine Membran a aus dünnem Messingblech abgeschlossen ist, die über einen Paßring gelegt und zwischen ihm und dem oberen Gehäuseteil eingeklemmt ist. Ein Manometer läßt die Spannung der Flüssigkeit erkennen. Auf der Membran ruht ein Kolben, der nur wenig kleiner ist als die Ringfläche, in der die Membran eingeklemmt ist; so bleibt nur ein schmaler Ringspalt für die Deformation der Membran bei eintretender Kolbenbewegung frei — genügend schmal, damit die Membran der Flüssigkeitsspannung gewachsen bleibt. Die Führung des Kolbens geschieht durch zwei Stahlblechfedern b und c, die außen im Gehäuse, innen zwischen verschiedenen Teilen des Kolbens eingeklemmt sind. Der Kolben

darf nur sehr kleine Bewegungen ausführen, soll nicht die Elastizität der Führungsfedern merkliche Störungen in die Messung bringen; er braucht aber auch nur die geringen Bewegungen zu machen, die den geringen Volumenänderungen des Inhaltes der Manometerfeder entsprechen; bei den großen Kolbenabmessungen genügt die Bewegung um einen Bruchteil eines Millimeters für Änderungen der Kraft von Null bis zum Höchstwert. Eine Hubbegrenzung, die selten mehr als 1 mm Hub freiläßt, wird daher genügend Spiel geben, nachdem einmal die richtige Menge Flüssigkeit eingefüllt und sorgfältig alle Luft ausgetrieben ist, die ja sonst größere Volumenänderungen bedingte. Die Hubbegrenzung und ein Staubverschluß *d* verhüten auch Beschädigungen der Führungsfedern bei unvorsichtiger Behandlung. — Bei kleinem Kolbendurch-

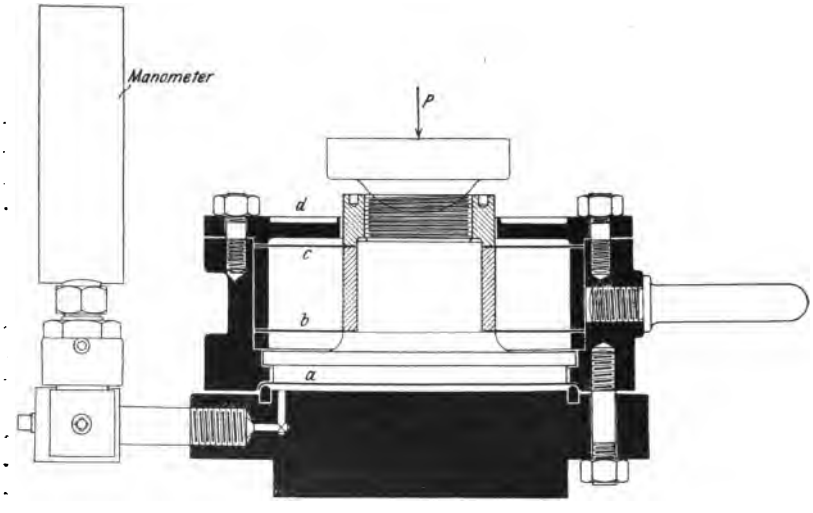


Fig. 152. Meßdose der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg A.-G.

messer würden größere Hübe nötig sein, um die Manometerfeder zu füllen, während doch die Führungsfedern weniger nachgiebig werden; bei Verkleinerung des Kolbendurchmessers ergeben sich daher ungünstigere Verhältnisse; überdies sind Manometer gerade für größere Spannungen zuverlässiger als für kleine. Deshalb ist die Meßdose hauptsächlich für Messung sehr großer Kräfte geeignet; die abgebildete Meßdose reicht bei rd. 160 mm Kolbendurchmesser für Kräfte von 20 000 kg aus; es entstehen daher Spannungen bis zu 100 at in der Flüssigkeit. — Die Unsicherheit, welche Kolbengröße für die Berechnung der Kraft maßgebend ist, weil der Spalt teilweise in Rechnung zu setzen wäre, wird ebenfalls mit zunehmender Kolbengröße geringer; im übrigen wird sie durch empirische Eichung der Dose beseitigt. — Die Meßdose ist besonders für Kraftmessungen im Materialprüfungswesen in letzter Zeit sehr in Aufnahme gekommen und bewährt sich durch Genauigkeit der Messung, Unempfindlichkeit gegen Erschütte-

rungen und bequeme Handhabung, so daß sie auch andern Ortes zu empfehlen sein wird. Wegen der mannigfachen Sonderbauarten sei auf die Literatur über Materialprüfung verwiesen.

Größere Kraftmesser werden namentlich für die *Untersuchung landwirtschaftlicher Maschinen* gebraucht, um den Kraftbedarf von Pflügen oder anderen Geräten zu bestimmen, die je nach der Bodenart verschieden groß ausfallen.

Da die Zugwiderstände der Feldgeräte in der Regel starke und schnelle Schwankungen zeigen, so kann die mittlere Zugkraft nur aus einem hinreichend weitläufig geschriebenen Diagramm gewonnen werden. Bei genaueren Messungen werden deshalb nur Registrierinstrumente verwendet, bei denen der Schreibhebel durch das kraftmessende Element bewegt wird, während eine dazu senkrechte Bewegung entweder von einem Urwerk oder durch ein auf dem Boden abrollendes Laufrad hervorgebracht wird. Wegen der ungleichförmigen Bewegung der Geräte ist der Laufradantrieb dem Uhrwerksantrieb vorzuziehen. Man benutzt statt des Laufrades auch eine Schnur, die an einem Ende festgehalten wird und sich beim Vorwärtsgehen des Gerätes von einer Trommel abwindet, eine allerdings etwas unbequeme Einrichtung.

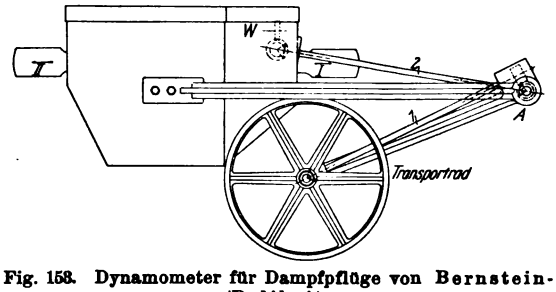


Fig. 153. Dynamometer für Dampfpflüge von Bernstein-Polikeit.

Die Zugkräfte bei Dampf- und Motorpflügen erreichen eine beträchtliche Größe (über 12 000 kg). Man benutzt daher mit Vorteil hydraulische Kraftmesser. Fig. 153 bis 154 zeigen ein mit Meßdose ausgerüstetes Instrument, das in folgender Weise wirkt.

Das Ganze ist in einem Kasten untergebracht, um gegen die Unbilden der Witterung und den Ackerschmutz geschützt zu sein. Mittels der Augen *I* und *II* wird der Apparat in das Zugseil eingeschaltet, das von einer feststehenden Winde aus den Dampfpflug bewegt. Infolge des Seilzuges schwebt das eigentliche Dynamometer frei in der Luft. Das Transportrad für den Papiertransport ist an einem um das Gelenk *A* (Fig. 153) drehbaren Pendelarm so befestigt, daß es durch sein Eigengewicht herabfällt und auf dem Boden abrollt. Durch die Wellen *1* und *2* wird die Bewegung des Transportrades auf eine Welle *W* im Innern des Dynamometerkastens und weiterhin, Fig. 154, auf das Papier übertragen.

Das Dynamometerwerk selbst, Fig. 154, ist an einem Rahmen aus Gußeisen befestigt, der zugleich das Blechgehäuse trägt. Der Rahmen ist an einer Stelle offen, und dort ist bei A_1 die Meßdose mit einem vorstehenden Lappen in ihn eingeklemmt. Die von der Meßdose empfangenen Kräfte werden durch ein Kupferrohr *K* auf ein Manometerwerk über-

tragen, das in der unteren Figur schwächer gezeichnet ist, da es vor der eigentlichen Bildebene liegt. Das Manometer schreibt die Kräfte auf einen Papierstreifen, dessen Bewegungseinrichtung nicht in den Einzelheiten gezeichnet ist; es sind auch nur einige der Führungstrommeln sowie eine Transporttrommel gezeichnet. Ein Nullschreiber zeichnet die Nullinie der Skala, ein Markenschreiber, magnetisch betätigt, gibt Zeitmarken.

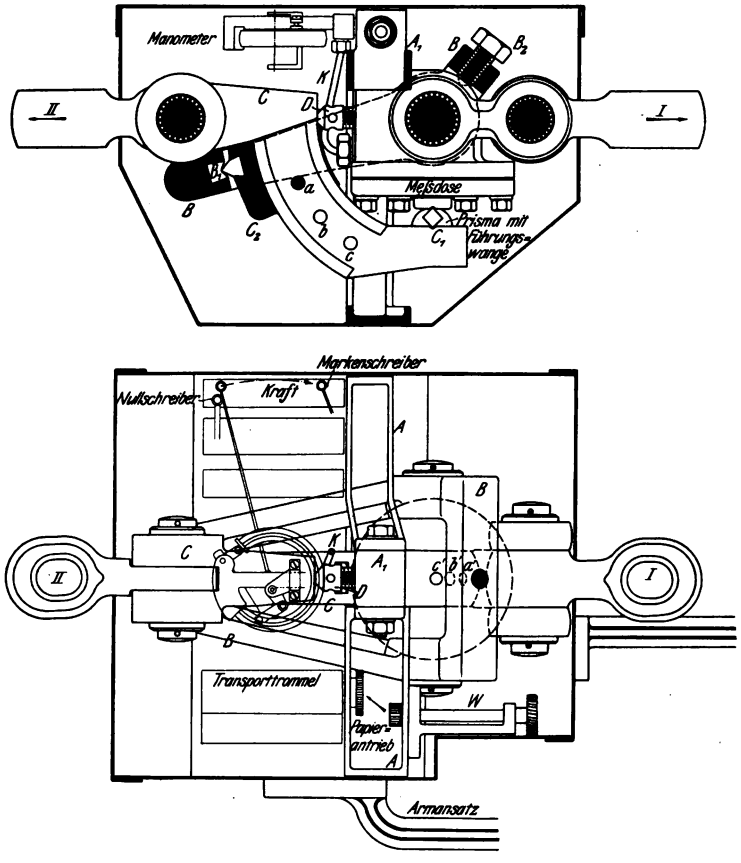


Fig. 154. Inneres Werk von Fig. 153.

Auf die Meßdose übt nun der Hebel CC_1 Kräfte aus, indem er bei C_1 durch einen Vierkantprisma hindurch auf den Deckel der Meßdose drückt. Der Hebel CC_1 erfährt die Kraft durch den am Auge *II* wirkenden Zug. Er ist zu dem Zweck um die Schneide mit Pfanne B_1 drehbar. Das Übersetzungsverhältnis aber und damit den Meßbereich der Meßdose kann man durch Verlegen des Drehpunktes B_1 verändern. Dazu ist B_1 in einem beweglichen Rahmenstück *BB* gelagert, das sich in dem mittleren, auch durch ein Auge der Meßdose hindurchgehenden

Bolzen führt, um diesen aber drehbar ist. Das Rahmenstück *BB* kann nun verschieden eingestellt werden, indem man den Paßstift *a* auch in die Löcher *b* oder *c* einführen kann. Entsprechend setzt man dann die Schraube B_2 von dem Loch *a'* in die Gruben *b'* oder *c'*. Schraube B_2 dient nur dazu, das Auseinanderfallen des Apparates in ungespanntem Zustand zu verhindern. Dem gleichen Zweck dient die Stellschraube *D*.

Durch die Verstellvorrichtung läßt sich der Meßbereich des Dynamometers in weiten Grenzen verändern. Es reicht bis 12 000 kg, wenn der Paßstift in *a* eingeführt ist, in der Stellung *c* dagegen ist der Meßbereich nur 3000 kg, bei entsprechend größerer Genauigkeit.

Die Kräfte werden in Bogenkoordinaten, als Funktionen des zurückgelegten Weges aufgeschrieben. Das Diagramm stellt die geleistete Arbeit dar, es ist trotz der Bogenkoordinaten ohne weiteres planimetrierbar, sofern nur die Schreibstiftausschläge — genauer gesagt, ihre Projektion auf eine zur Papierbewegung Senkrechte — proportional der Kraft bleiben.

Die Einrichtung für die Papierbewegung ist den Bedürfnissen bei landwirtschaftlichen Kraftmessern entsprechend besonders groß und so ausgebildet, daß die richtige Ablaufrichtung durch einfache Umschaltung sowohl bei vorwärts- wie rückwärtslaufendem Transportrad erzielt wird.

Andere Formen von Dynamometern dienen zur Bestimmung der von Lokomotiven ausgeübten Zugkraft, sie werden in einem besonderen Dynamometerwagen durch den Zughaken betätigt. Oft sind sie registrierend. Vgl. das Literaturverzeichnis.

76. Bremsdynamometer. Das von einer im Gang befindlichen Kraftmaschine gelieferte Drehmoment kann durch Abbremsen gemessen werden. Die Bremsdynamometer messen das Drehmoment, indem sie die ihm entsprechende Energie vernichten, meist in Wärme umsetzen. Die Bremsdynamometer haben also eine *doppelte Aufgabe*, nämlich erstens die Maschine zu belasten, d. h. das ihrem Gang entgegenstehende Drehmoment zu erzeugen, und zweitens das erzeugte Drehmoment zu messen. Beide Funktionen sind unabhängig voneinander. Die *Erzeugung* des Drehmomentes geschieht meist durch mechanische Reibung fester Teile, der Bremsbacken oder des Bremsbandes, auf einer Bremsscheibe; an Stelle davon kann aber auch der hydraulische Widerstand von Flüssigkeiten treten, oder der durch Wirbelströme oder durch den Rückdruck von Maschinen hervorgerufene Widerstand. Die *Messung* des Drehmomentes geschieht durch Beobachten der Kraft, die in gewissem Abstand von der Achse ausgeübt wird, meist durch Ausgleichen mit Gewichtsstücken, oft auch unter Verwendung einer Wage, seltener unter Verwendung eines Feder- oder Flüssigkeitsdynamometers. — Will man die Leistung der Maschine kennen, so muß man außer dem Drehmoment stets noch die minutliche Umlaufzahl feststellen.

Die einfachste Form eines Bremsdynamometers ist der *Pronysche Zaum* (Fig. 155 und 156). Auf dem Umfang einer Riemenscheibe oder eines Schwungrades wird Reibung dadurch erzeugt, daß eine mit einem Hebelarm verbundene oft hölzerne Backe und ein eisernes Band mit oder ohne Holzfutter durch Anziehen der Flügelschrauben gegen ein-

ander und gegen die Scheibe gezogen werden. Dadurch wird am Umfang der Scheibe Reibung erzeugt und die Maschine belastet. Die Größe der Belastung wird gemessen, indem man mit Hilfe der Brückenwage die Kraft feststellt, die der Hebel an seinem Ende ausübt (Fig. 155), oder indem man an das Hebelende Gewichte anhängt, bis die Bremse im Gleichgewicht ist und frei zwischen den Anschlagstiften spielt (Fig. 156). Ist nun im Einspielen des Hebels am Hebelarm l mtr eine Kraft P kg gemessen, so ist die Maschine mit dem Drehmoment $M_d = P \cdot l$ mkg belastet, und bei n minutlichen Umläufen ist die Leistung der Maschine $N = \frac{M_d \cdot n}{716} = \frac{l \cdot P \cdot n}{716}$ PS. Die Größe $\frac{l}{716}$ ist für einen Zaum, mit dem man eine Reihe von Bremsungen ausführt, stets die gleiche. Man ermittelt sie ein für allemal und nennt sie die *Bremskonstante* $C = \frac{l}{716}$. Bei der einzelnen Bremsung ist dann $N = C \cdot P \cdot n$. Recht zweckmäßig ist es, $l = 716$ mm zu machen, dann wird C = 0,001:

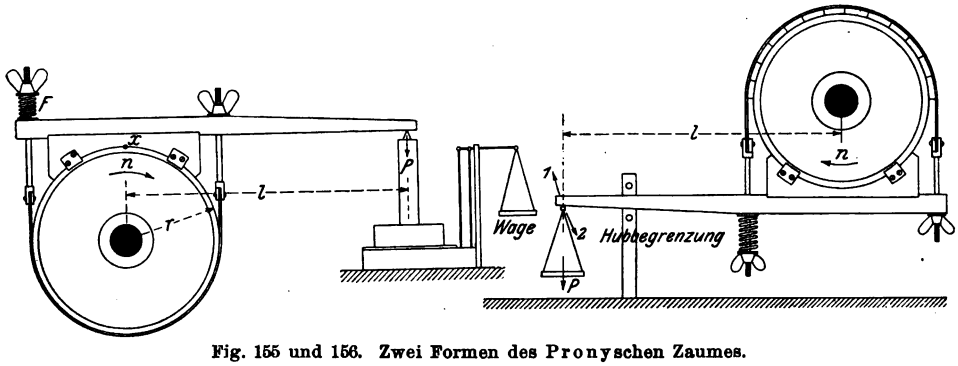


Fig. 155 und 156. Zwei Formen des Pronyschen Zaumes.

Man kann die Gleichung auch direkt und anschaulicher ableiten: Am Umfang der abgebremsten Riemenscheibe wirken rundherum Reibungskräfte, die wir zu einer Umfangskraft U zusammenfassen. U wirkt am Zaum im Sinne der Wellenumdrehung, an der Scheibe umgekehrt. Der Angriffspunkt dieser Kraft U, das ist der Scheibenumfang, legt in der Sekunde $2\pi r \cdot \frac{n}{60}$ Meter zurück. Also ist die Leistung $N = \frac{U \cdot 2\pi r \frac{n}{60}}{75}$. Hierin sind U und r unbekannt, es ist aber $U \cdot r = P \cdot l$ eine Gleichgewichtsbedingung für den Zaum. Also wird $N = \frac{P \cdot l \cdot 2\pi n}{60 \cdot 75} = C \cdot P \cdot n$, wo $C = \frac{2\pi l}{60 \cdot 75}$ dieselbe Bremskonstante ist wie oben.

In P darf das Eigenmoment des Holzhebels nicht enthalten sein. Vor Beginn des Versuchs löst man deshalb die Schrauben ganz, bringt

eine Schneide, etwa eine Dreikantfeile bei x zwischen Scheibe und Bremse und tariert, nachdem man so die Reibung beseitigt hat, in Fig. 155 die Wage aus. Die Tara ist dann später abzuziehen. Oder man gleicht durch ein links an den Balken gehängtes Gegengewicht das Moment aus. In Fig. 156 wäre entsprechend zu verfahren.

Um gutes Einspielen zu erzielen, ist freilich zweierlei nötig; eine gewisse Elastizität in der Spannvorrichtung und passende statische Verhältnisse der gesamten Bremsanordnung. Die *Elastizität* muß, wenn nicht das Bremsband selbst und etwa der auf Biegung beanspruchte Hebel genügend nachgiebig ist, durch besondere Federn erreicht werden, die bei Fig. 155 und 156 in Gestalt von auf Druck beanspruchten Schraubenfedern F vorhanden sind. Ohne diese Federn würde bei einer nur geringen Drehung der Spannmuttern die Anspannung des Bremsbandes sogleich stark ab- oder zunehmen; Federn dagegen lassen eine Vergrößerung der Anspannung nur allmählich zu, in dem Maße, wie sie sich zusammendrücken; nur wenn die Feder vorhanden ist, kann man also ein gewünschtes Drehmoment mit Sicherheit fein einstellen. Allerdings muß die Feder passende Elastizität haben, nämlich bei der Höchstspannung des Bremsbandes sich genügend zusammengedrückt haben, ohne daß doch schon durch Aufeinanderliegen der Gänge die Elastizität vorzeitig verloren geht. — Was die *statischen Verhältnisse* der Bremsanordnung anlangt, so muß dieselbe in der Einspielstellung im stabilen Gleichgewicht sein. In Fig. 155 ist der Schwerpunkt des Bremszaumes allerdings über dem Wellenmittel, so daß er sich also an sich, auch wenn ausbalanziert, im labilen Gleichgewicht befindet: bei der geringsten Abweichung aus der Mittellage wird er zu gänzlichem Umfallen neigen. Nun sind aber die Brückenwagen stark statisch gebaut, auch wirkt es im Sinne größerer Stabilität, daß der Hebelarm sich vergrößert, wenn die Bremse mitgenommen wird, sich aber verkleinert, wenn sie zurückfällt. Diese Umstände wirken dahin, daß im allgemeinen die Anordnung stabil sein wird; doch kann sie instabil sein, wenn der Oberbalken sehr schwer und die Brückenwage sehr klein ist. Bei Anwendung von Gewichten wird die Bremse nur dann stabil, wenn der Balken unten ist und möglichst auch noch der Hebelarm beim Zurückfallen der Bremse abnimmt; bei oben befindlichen Balken wird die Bremse auch dann nicht stabil, wenn man den Hebel so durchkröpft, daß das Gewicht in Wellenhöhe angehängt werden kann, oder wenn man durch ein Segment wie in Fig. 159 wenigstens die Verringerung des Hebelarmes beim Zurückfallen der Bremse vermeidet. Die Veränderlichkeit des messenden Hebelarmes in Fig. 156, Pfeil 1—2, hat übrigens zur Folge, daß die Bremse zwar gut steht, daß aber die Messung wesentlich falsch wird, wenn der Hebel nicht mitten zwischen den Hubbegrenzungen einspielt.

Man wird erkennen, daß die Spannfedern für sichere Einstellung einer bestimmten Belastung, die Erreichung stabilen Gleichgewichtes für ihre saubere Messung wesentlich ist. Wir erinnern dabei überhaupt noch einmal an die Tatsache, daß der Zaum zwei Zwecken dient: er soll die zu untersuchende Maschine belasten — das geschieht durch Anziehen der Flügelmuttern — und er soll die Größe der erzeugten

Belastung messen — das geschieht durch die Wage oder die Gewichte. Beide Funktionen sind unabhängig voneinander: durch Vermehren der Gewichte ändert man die Belastung nicht; wenn man aber die Maschine nur belasten, nicht die erzeugte Belastung messen will, so kann man die Wage durch ein festes Widerlager ersetzen.

Man kann auch oben und unten Backen verwenden, die durch Spannbolzen gegen die Scheibe gepreßt werden, und kann durch Verwendung von Gußeisen für die Scheibe und für die Backen ein sehr ruhiges Laufen erzielen, wo es sich um eine dauernd zu benutzende Bremse handelt. — Andererseits werden bei der *Bandbremse* Bremsbacken ganz vermieden; ein rund um die Scheibe gehendes Stahlband wird an einer Stelle durch eine Mutter angespannt; auch hier kann man die Messung durch Anhängen von Ausgleichgewichten oder durch Abstützen gegen eine Brückenwage bewirken. Bei geringer Höhe der Scheibe über dem Fußboden muß man das Seil nach Fig. 157 erst über eine Rolle gehen lassen. Falsch wäre die Anbringung des Seils am Bremsband nach Fig. 158; wenn die Gewichte auf und ab pendeln, ändert sich der Hebelarm, an dem sie angreifen. Das Seil soll ein Stück über das Bremsband hin- und dann tangential ablaufen. Der Hebelarm l für die Gewichte P ist der Scheibenradius vermehrt um die Bremsbanddicke und die halbe Seildicke.

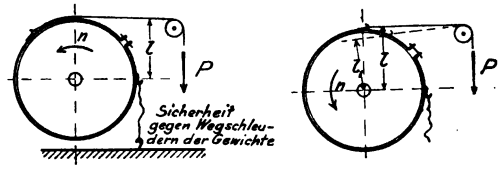


Fig. 157 und 158. Bandbremse. Richtige und falsche Anlenkung des Seiles.

Wo Gewichte zum Messen verwendet werden, ist für eine *zuverlässige Hubbegrenzung* zu sorgen, die der Bewegung der Bremse so enges Spiel läßt, daß die Gewichte nicht erst größere Energiemengen in sich aufspeichern können; die Hubbegrenzung durch Seil oder Stifte muß genügend elastisch sein, um nicht durchschlagen zu werden. Überhaupt darf die Herstellung einer Bremse nicht sorglos geschehen; der Bruch eines Teiles führt leicht zum Abschleudern von Gewichten oder anderen Teilen. Die Abbremsung insbesondere größerer Leistungen ist daher niemals ohne Gefahr. — Gegen seitliches Herabgleiten ist jede Bremse auch zu sichern.

Um einen Anhalt für die *Abmessungen einer Bremse* zu haben, berechnet man das abzubremsende Drehmoment, dieses wird $M_d^{\mathrm{m}\cdot\mathrm{kg}} = 716\,\frac{N^{\mathrm{PS}}}{n^{\mathrm{Uml/min}}}$ sein. Bei einem Radius r der Bremsscheibe ist dann die aufzuwendende Umfangskraft $U = \frac{M_d}{r}$. Die Bremsbacken oder das Bremsband sind etwa mit dem Zehnfachen von U anzupressen, da der Reibungskoeffizient zu 0,1 anzunehmen ist. Man muß also jeden der Bolzen in Fig. 155 und 156 mit 2,5 U anspannen können, auch das Bremsband in Fig. 157 muß bis zu 2,5 U ausreichen. Hiernach werden auch die Federn zu wählen sein.

Außerdem darf die Flächenpressung zwischen Scheibe und Bremse möglichst nicht 4 kg auf den Quadratzentimeter übersteigen, um die

Schmierung zu sichern. Hier ist man indes meist an die gegebene Scheibe gebunden. Die Flächenpressung ist $\frac{10\,U}{f}$, wenn f die ganze an der Scheibe anliegende Bremsbacken- oder Bremsbandfläche ist.

Bei der *Ausführung der Bremsung* hängt man am besten die Gewichte entsprechend der gewünschten Belastung an den Bremsarm, oder stellt sie auf die Wage und regelt während der Versuchsdauer die Bandspannung nach, so daß die Bremse immer frei spielt. Man wird nämlich bald bemerken, daß sich die von einem Zaum erzeugte Reibung fortwährend und in ziemlich weiten Grenzen ändert. Wenn man mit Öl gut schmiert, so werden die Schwankungen geringer, weil die Reibung der Ölteilchen an die Stelle der Reibung fester Körper tritt. An sich ist sonst die Schmierung dem Zwecke der Bremse, Reibung zu erzeugen, zuwider; man schmiere also nicht mehr als nötig.

Nicht identisch mit der Schmierung ist die Kühlung, welche die aus der vernichteten Arbeit erzeugte Wärme abführen soll. Sie soll möglichst reichlich geschehen, am besten durch Wasser. Danach ist es zweckmäßig, Schmierung und Kühlung ganz zu trennen, etwa das Kühlwasser reichlich durchs Innere der hohl ausgeführten Scheibe zu schicken, und das schmierende Öl spärlich zwischen Scheibe und Bremse zu bringen. Solche umständliche Anordnung kann man nur bei festen Laboratoriumseinrichtungen verwenden. Oft begnügt man sich damit, entweder Öl oder Wasser zwischen Scheibe und Bremse zu bringen. Eine Emulsion von Öl in Seifenwasser, wie man sie beim Bohren verwendet, tut gute Dienste.

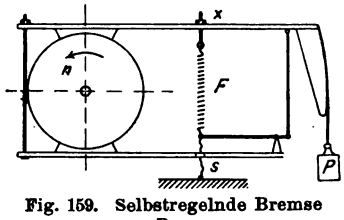


Fig. 159. Selbstregelnde Bremse von Brauer.

Wenn man Holzbacken oder doch Holzfutter verwendet, so bringt man zweckmäßig tiefe Nuten darin an, mit einem Einlaßrohr und einem Abflußrohr für den Wasserumlauf. Läßt man das Abflußrohr fort, so kann nur wenig Wasser zutreten — so viel, wie durch schlechtes Anliegen der Bremse ausquillt, und das ist bei gutem Anliegen nicht für die Kühlung ausreichend. —

Weil sich bei nicht ganz gleichmäßiger Schmierung die Reibung beständig ändert, so muß man bei Zaum und Bandbremse die Anspannung der Bremse von Hand nachregulieren, so nämlich, daß das Produkt aus Reibungskoeffizient und Spannung der Bremsbacken konstant bleibt — die Umfangskraft soll konstant bleiben. *Selbstregelnde Bremsen* bewirken diese Nachregelung automatisch.

Fig. 159 erklärt das Prinzip der Selbstregelung. Die Maschine soll so belastet sein, wie es dem Gewichte P entspricht. Ist nun etwa die Anspannung der Bremsbacken zu groß, so wird die ganze Bremse in der Drehrichtung mitgenommen. Dadurch wird Schnur s gespannt und löst die Bremse ein wenig. Ist umgekehrt die Reibung der Bremsbacken zu gering, so zieht das Gewicht P die Bremse zurück, und die Feder F spannt die Bremse nach. Beim Beginn des Versuches hängt man das

gewünschte Gewicht P an die Bremse und reguliert die Schraube x so ein, daß die Schnur s gerade schlaff bleibt.

Die Bremse Fig. 160 wird seit Jahren im Prüffelde von Siemens & Halske angewendet und gelobt. Je nachdem, ob die Bremse durch zu große Reibung mitgenommen wird oder ob sie zurückfällt, wird der Hebel durch Anstoßen an Stift d im einen oder anderen Sinn verdreht und das Bremsband gelöst oder gespannt. Die Stifte b und c dienen nur als Hubgrenzen für den Notfall. Zum Einstellen am Beginn des Versuches dienen die Muttern x und y; erstere ändert die Länge des Bremsbandes, letztere den Hebelarm, an dem die Spannung des Bandes angreift. Erstere gibt eine wirksame Grob-, letztere eine gute Feinstellung. Die Handhabung im einzelnen ist in Elektrot. Z. 1901, S. 339, kürzer in Z. d. V. d. Ing. 1901, S. 1078 beschrieben. — Die letzte Bremse hat sich praktisch durchaus bewährt, doch ist zu beachten, daß sie,

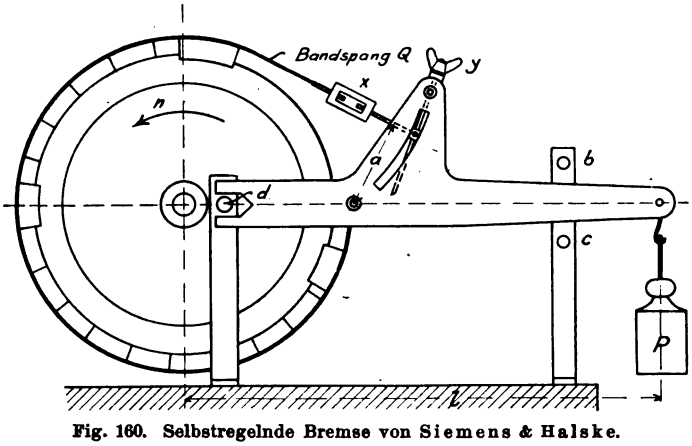


Fig. 160. Selbstregelnde Bremse von Siemens & Halske.

einmal eingestellt, nicht auf konstante Umfangskraft, sondern auch bei wechselndem Reibungskoeffizienten auf konstante Bandspannung Q reguliert: es muß ja stets $Q \cdot a = P \cdot l$ sein. Entspricht diese Bandspannung nicht mehr dem angehängten Gewicht P, so kann sie sich nur dadurch ändern, daß der Hebel dauernd am Stift d anliegt. Die Kraft, mit der diese Berührung statthat, fälscht das Meßergebnis. Um diese Fälschung möglichst klein zu halten, ist der Stift d dicht an die Welle der Bremsscheibe gesetzt: das Moment der dort auftretenden Zusatzkraft wird klein sein. — Ganz ebenso wird das Meßergebnis beim Zaum, Fig. 159, um so viel gefälscht, wie die Schnur s gespannt ist. Diese Kraft ist klein, weil sie am langen Ende des zweiarmigen Hilfshebels angreift; ihr Moment ist sehr klein, wenn der Angriffspunkt möglichst nahe an die Welle gerückt wird.

Soll dieser Fehler vermieden werden, so muß die Nachstelleinrichtung selbstsperrend sein, so daß sie ohne Zusatzkraft bei jeder Bremsbandspannung einspielen kann. Die folgende Bremse (Fig. 161) befindet sich im Technischen Institut in Boston. Man wird erkennen, wie das

von der Reibung erzeugte Drehmoment durch die Gewichte G_1 und G_2 ausgeglichen und gemessen wird. Sobald man diese Gewichte ändert, ändert sich von selbst die Spannung des Bremsbandes. Die Sperrkegel s_1 und s_2 (in der Nebenfigur) werden nämlich durch die Maschine dauernd in schwingende Bewegung gesetzt und wollen die Spannung des Bremsbandes der eine vermehren, der andere vermindern. Beide werden für gewöhnlich durch Segment S daran gehindert. Dies Segment wird aber vom Hebel h aus verstellt, sobald die Reibung am Scheibenumfang nicht gerade den aufgelegten Gewichten entspricht und daher das ganze Gestell der Bremse entweder im einen Sinn der Reibung

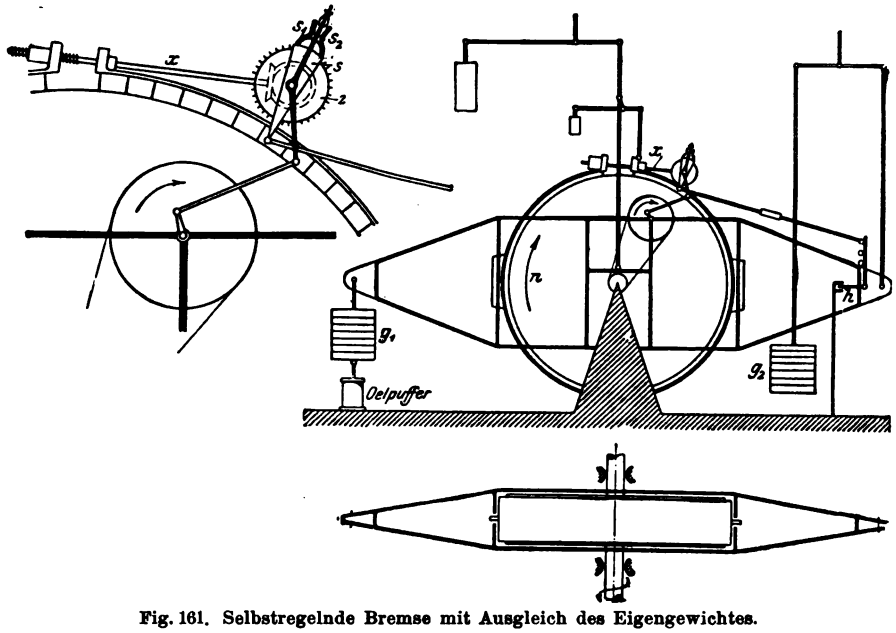


Fig. 161. Selbstregelnde Bremse mit Ausgleich des Eigengewichtes.

oder im anderen Sinn den Gewichten folgt und aus der wagerechten Lage kommt. Dann kommt einer der Sperrkegel s_1 und s_2 in Eingriff mit z, und Schraube x ändert die Spannung des Bremsbandes. — Außerdem ist noch die Einrichtung zur *Ausgleichung des Eigengewichtes* zu erwähnen. Mit den früher dargestellten Bremsen konnte man nämlich die Belastung nicht bis zum Leerlauf kontinuierlich vermindern, sondern die Mindestbelastung wurde, auch bei ganz entspanntem Bremsband, dadurch bestimmt, daß das Eigengewicht der Bremse noch auf der Scheibe ruhte. Für Leerlauf muß man dann die Bremse abbauen. Bei schwereren Bremsen ist das jedenfalls unerwünscht, auch will man gelegentlich bei sehr kleiner Belastung arbeiten. Das zu ermöglichen, ist in Fig. 161 die ganze Bremse an der Decke aufgehängt, und zwar unter Anwendung eines Hebels mit Gewichtsbelastung, der eine kleine senkrechte Bewegung zuläßt, ohne daß je mehr als gerade das Eigengewicht

ausgeglichen wird. Das Schaltwerk x ist, weil es unsymmetrisch angeordnet ist, noch besonders ausgeglichen. —

Eine sehr einfache selbstregelnde Bremse ist noch in Fig. 162 dargestellt. Sie besteht aus einem einfachen Hanfgurt von der Breite der Bremsscheibe mit aufgenieteten Blechkrammen, die seitliches Abgleiten verhindern. Die Blechkrammen sind teils innen, teils außen an das Band genietet; wird durch zu große Reibung der Gurt mitgenommen, so kommen mehr der innen aufgenieteten Krammen an die Scheibe, und die Reibung vermindert sich. Durch Befeuchten des Gurtes läßt sich eine gewisse Kühlung der Scheibe erzielen. Ein Nachteil ist es, daß das Außenlager mit einer großen Kraft belastet wird. In der Hinsicht ist die *Seilbremse* besser.

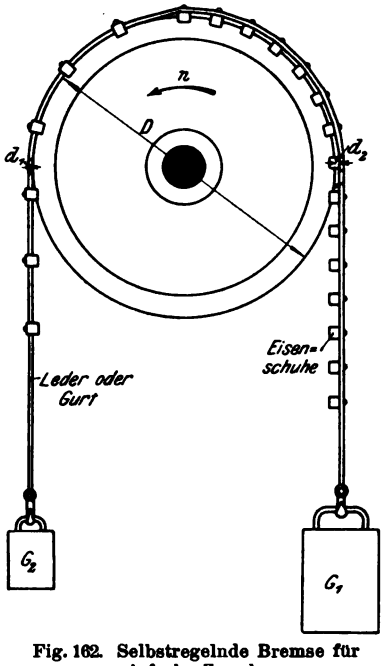


Fig. 162. Selbstregelnde Bremse für einfache Zwecke.

Ein Seil ist an der Decke mittels Federwage aufgehängt, Fig. 163, einmal um die zu belastende Scheibe geschlungen und dann zum Boden fortgeführt. Dort hängt man Gewichte nach Bedarf an. Die Anordnung muß so sein, daß die Gewichte angehoben werden, wenn die Scheibe sich dreht. Hängen etwa 10 kg bei G am Haken, so ist das Seil von G bis a mit $P = 10$ kg gespannt. Am Umfang der Scheibe findet nun aber Reibung statt. Wenn diese Reibung im Quadranten von a bis b gerade 6 kg ausmacht, wenn also auch die Scheibe in diesem Quadranten eine Umfangskraft von 6 kg erfährt, so hat das Seil bei b nur noch eine Spannung von $10 - 6 = 4$ kg; die fehlenden 6 kg werden vom Umfang der Scheibe getragen. Eine Umfangskraft von im ganzen 3 kg im Quadranten bc vermindert die Seilspannung bei c auf 1 kg, und wenn dies eine Kilogramm noch vom Umfange cd aufgenommen wird, so ist das Seil von d bis e spannungslos, es hängt schlaff herab, die Federwage F zeigt nichts. — Vermindern wir durch gute Schmierung die Reibung, so werden von den drei Quadranten von a bis d vielleicht nur 6 kg getragen, das Seil hat bei d noch 4 kg Spannung, und wenn Quadrant de noch 1 kg weg-

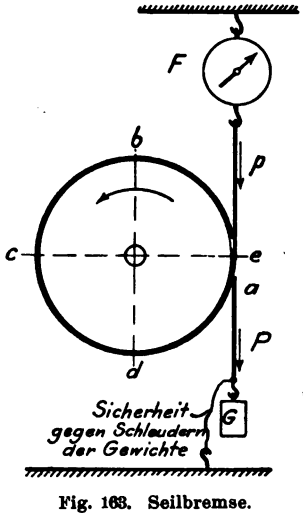


Fig. 163. Seilbremse.

nimmt, so gehen $p = 3$ kg ins Seilende eF und werden an der Federwage abgelesen.

Im ersten Fall war die am Scheibenumfang wirksame Umfangskraft 10 kg, im zweiten Fall ist sie $10 - 3 = 7$ kg. Allgemein ist sie gleich dem Unterschied der Spannung der beiden Seilenden, also gleich dem anhängenden Gewicht, vermindert um die Angabe der Federwage. Diese Umfangskraft $P - p$ ist gemessen in der Mitte des Seiles, also an einem Hebelarm $R + r$, wo R den Scheiben- und r den Seilradius bedeutet. Bei n minutlichen Umläufen ergibt sich also die Bremsleistung

$$N = \frac{2\pi \cdot (P - p) \cdot (R + r) \cdot n}{60 \cdot 75} = C \cdot (P - p) \cdot n .$$

Wir haben wieder in der Bremskonstanten $C = \frac{2\pi (R + r)}{60 \cdot 75}$ diejenigen Größen zusammengefaßt, die bei mehreren Versuchen die gleichen bleiben. Übrigens hat man noch als Tara das Eigengewicht des Hakens und das Gewicht der Seilenden Fe und aG einzuführen; wenn diese Tara k ist, so wird die Bremsleistung $N = C \cdot (P - p + k) \cdot n$. Diese Korrektion macht meist mehrere Prozente aus.

Fig. 164. Seil zur Seilbremse.

Eine Seilbremse kann man sich leicht aus Stricken zusammenbauen. Krammen (Fig. 164) sichern die Seile gegen seitliches Herabfallen von der Scheibe. Man nimmt zwei Seile nebeneinander, um sie bei e, Fig. 163, symmetrisch durcheinander stecken zu können. Die Krammen müssen einigermaßen symmetrisch über den Umfang der Scheibe verteilt sein, damit sie nicht eine zusätzliche Tara liefern.

Die Seilbremse dient, wie der Zaum, dem doppelten Zweck, die Maschine zu belasten und die erzeugte Belastung zu messen. Beides ist aber hier nicht so scharf zu trennen wie beim Zaum. Das anhängende Gewicht tut beides.

Die Seilbremse arbeitet namentlich bei hohen Umlaufzahlen ruhiger als der Zaum, weil sich das Schmiermittel in dem als Docht wirkenden Seil sehr gleichmäßig verteilt. Zum Schmieren verwendet man Wasser, das zum Verdampfen kommen kann und dann weitere Erwärmung energisch hindert, oder Öl. Die Seilbremse hat vor dem Zaum den weiteren Vorteil noch größerer Einfachheit der Herstellung, aber man kann die Belastung nicht beliebig weit steigern, weil schließlich beim Vermehren der Gewichte die Angabe der Federwage um ebensoviel zunimmt; man belastet dann die Federwage, nicht mehr die Maschine. Mehrfache Umschlingung der Scheibe schafft, wenn sie ausführbar ist, Abhilfe. Unangenehm ist es aber, daß man nicht, wie beim Zaum durch Anziehen der Schrauben, die Belastung dauernd auf einem Wert halten kann. Jedes Schmieren hat Schwankungen im Gefolge.

Bei hohen Umlaufzahlen setzt man zweckmäßig an die Stelle der Reibung fester Körper die innere Reibung von Flüssigkeiten. Dampfturbinen kann man mit einer *Flüssigkeitsbremse* nach dem Schema der

Fig. 165 belasten. Eine Reihe von Scheiben läuft mit der zu untersuchenden Welle zwischen anderen im Gehäuse feststehenden Scheiben um. Das Gehäuse wird, je nach der gewünschten Leistung, mehr oder weniger mit Wasser gefüllt, zum Grobregulieren hat man verschiedene Ventile, Feinregulierung erzielt man durch Bedienen des benutzten Ventils. Sobald die Welle sich dreht, erfährt das Gehäuse ein Drehmoment; dessen Messung geschieht wieder durch angehängte Gewichte oder mit einer Brückenwage an dem Arm. Weil der Widerstand in solcher Bremse mit dem Quadrat der Umlaufzahl steigt, so ist die Bremse nur für sehr schnell laufende Maschinen am Platze, etwa für Dampfturbinen. Bei kleinen Umlaufzahlen erzeugen solche Flüssigkeitsbremsen kaum ein Drehmoment. Bei hohen Umlaufzahlen aber ergeben sie eine besonders gute Kühlung.

Für große Leistungen bei mäßigen Umlaufzahlen nimmt die einfache Flüssigkeitsbremse nach Fig. 165 bald unbequem große Abmessungen an. So braucht man (nach Angaben der Germaniawerft) für 3000 PS

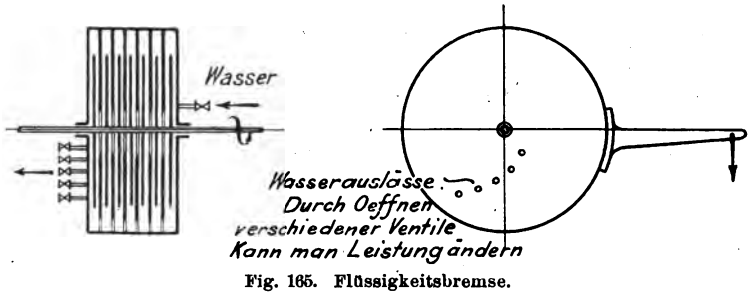


Fig. 165. Flüssigkeitsbremse.

bei 600 Touren bereits 6 Scheiben von 2000 mm Durchmesser. Für eine Scheibe von 2 m Durchmesser würde danach etwa die Beziehung

$$M_d^{\text{mkg}} = 0{,}0017\, n^2; \quad N^{\text{PS}} = 0{,}00024\, n^3$$

für die Abhängigkeit des Drehmomentes und der Leistung von der Tourenzahl zutreffen.

Bei der *Froudebremse* wird ein schon bei niederen Umlaufzahlen bedeutenderer Widerstand dadurch hergestellt, daß an Stelle der regellosen Wirbelbewegung eine geordnete Kreisbewegung des Wassers systematisch erzeugt und dauernd wieder zerstört wird.

In Fig. 166 sind die feststehenden Teile des Gestelles geschwärzt, der im Gestell pendelnde Ständer ist weit, der rotierende Läufer ist eng schraffiert. Die zu bremsende Maschine setzt den Läufer in Umlauf. Wasser wird dem Innern der Bremse durch einen biegsamen Druckschlauch zugeführt, tritt in Ringräume $A_1 A_2$ und von hier aus durch eine Anzahl von Bohrungen in die Bremskammern $B_1 B_2$. Das Wasser entweicht durch die Spalte zwischen Läufer und Ständer in den Ringraum C, von dem aus es nach oben abfließt.

Der erzeugende Querschnitt der ringförmigen Bremskammern B_1 und B_2 ist eiförmig und verteilt sich zur Hälfte auf Ständer und Läufer.

Die Bremskammern sind durch eine Anzahl ebener Wände in Zellen geteilt; die Wände sind schräg, zur Welle der Bremse windschief, im Ständer und im Läufer in gleicher Richtung geneigt, in die Bremskammern eingesetzt (Fig. 167). Die Zellenwände des Ständers sind je zweimal durchbohrt: die eine sich von der Achse schräg entfernende Bohrung führt das Kühlwasser von den Ringräumen $A_1 A_2$ her den Bremskammern zu, die andere Bohrung ist in der Figur der Achse parallel, in Wahrheit wegen der Schräge der Zellenwände zu ihr windschief, sie verbindet die Bremskammern mit einem Ringraum $E_1 E_2$, von wo sich eine Entlüftungsleitung mit dem Wasserabfluß vereinigt. Die Mitte des Bremskammerquerschnittes ist also stets belüftet.

Die Bremswirkung kommt dadurch zustande, daß nach Maßgabe der eingezeichneten Pfeile in der Läuferhälfte jeder Kammer eine Bewegung radial von der Achse weg eingeleitet wird, die im Ständer eine Wasserbewegung gegen die Achse hin zur Folge hat, so daß der Wasserkreislauf sich schließt. Die Zellenwände aber mit ihren scharfen (werkstattmäßig besonders scharf hergestellten) Kanten durchschneiden den Wasserstrom, gegen den sie anlaufen, dauernd und verwandeln dadurch die geordnete Bewegung in ungeordnete Wirbelbewegung, woraus nach dem Energiesatz die Bremswirkung auch ohne genauere Betrachtung der hydraulischen Zusammenhänge folgt.

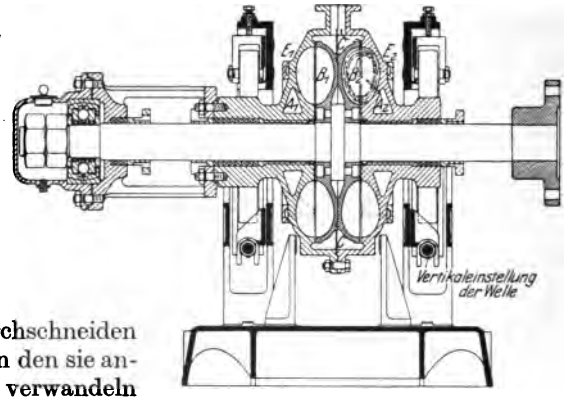


Fig. 166. Froude-

Fig. 167. Tangentialer Schnitt durch die Schaufelung.

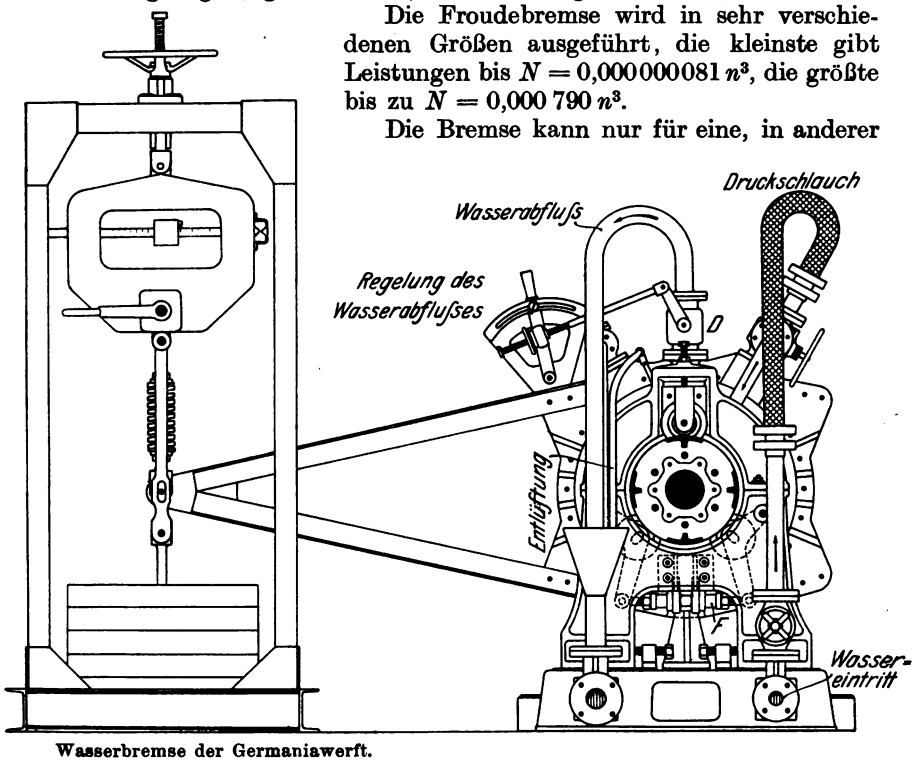
Die Regelung des belastenden Drehmomentes erfolgt durch Bedienen des Wasserabflußventils D mittels Händels und Feinstellung. Die Zellen füllen sich dadurch mehr oder weniger mit Wasser, der Luftraum ändert sich entsprechend. Das erzeugte Drehmoment wird gemessen, indem es roh durch Gewichte abgeglichen wird, worauf der Überschuß eine Laufgewichtswage betätigt.

In baulicher Hinsicht ist darauf hinzuweisen, daß der Ständer in zweimal drei Rollen im Gestell gelagert ist. Die Rollen sind nachstellbar, und zwar die unteren vier durch zwei Stellvorrichtungen F mit Rechts- und Linksgewinde, die auf Winkelhebel wirken. Hiermit kann man die Höhe regulieren, ferner ergeben die Stellschrauben unterhalb des Buchstabens F eine horizontale Verstellung der Bremswelle, so daß also die Bremse gegen die Kraftmaschine ausgerichtet werden

kann. Zur Verringerung der Reibung sind die Rollen ihrerseits noch mit Kugellagerung versehen (die in der Figur fortblieb).

Die Froudebremse wird in sehr verschiedenen Größen ausgeführt, die kleinste gibt Leistungen bis $N = 0{,}000000081\, n^3$, die größte bis zu $N = 0{,}000\,790\, n^3$.

Die Bremse kann nur für eine, in anderer



Wasserbremse der Germaniawerft.

Ausführung aber auch für beide Drehrichtungen (umsteuerbar) verwendet werden. Im letzteren Fall wird die Schaufelung nach Fig. 168 statt nach Fig. 167 ausgeführt: Für die eine Drehrichtung dient die linke, für die andere die rechte Bremskammer. Da aber in der jeweils anderen Bremskammer die gebildeten Wasserkreise nicht regelmäßig zerschnitten werden, so bleibt die Bremswirkung im wesentlichen halb so groß, so daß also eigentlich von einer Bremse für Vorwärts- und einer für Rückwärtsgang gesprochen werden muß, die zusammengebaut sind.

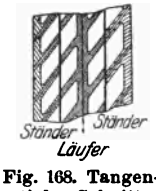


Fig. 168. Tangentialer Schnitt durch die Schaufelung einer umsteuerbaren Froudebremse.

Die Anzahl der Zellen des Läufers unterscheidet sich von derjenigen des Ständers um eins. Dadurch wird erreicht, daß das erzeugte Drehmoment keine periodischen Schwankungen erleidet, sondern während des ganzen Umlaufs gleichförmig bleibt. —

Endlich kann man an Stelle der mechanischen Reibung den durch elektrische Wirbelströme erzeugten Widerstand setzen, den eine massive Metallscheibe, etwa das Schwungrad, erfährt, wenn sie sich an einem

kräftigen Elektromagneten vorbeibewegt. Die von diesem erzeugten Kraftlinien müssen sich, aus seinen Polen austretend, durch das Schwungrad hindurch schließen. Eine *Wirbelstrombremse* kann nach Fig. 169 ausgeführt werden. Sie zeichnet sich durch große Einfachheit und dadurch aus, daß man die wesentlichen Teile, die U-Träger und die Elektromagnete, leicht für Schwungräder verschiedener Größe ummontieren kann. So erscheint sie auch für nichtstationäre Zwecke, für die Praxis, brauchbar, wo elektrischer Strom zur Verfügung steht. Verschiedenen Spannungen kann man sich anpassen durch Parallel- und Hintereinanderschalten der beiden Magnete, auch den Luftspalt zwischen Schwungrad und Magnet kann man variieren. Die Belastung regelt man mittels eines Vorschaltwiderstandes, der die Stromstärke, wenige Ampere, ändert. Die erzielte Belastung wird wie beim Zaum gemessen: nur die Erzeugung der Belastung ist eine andere.

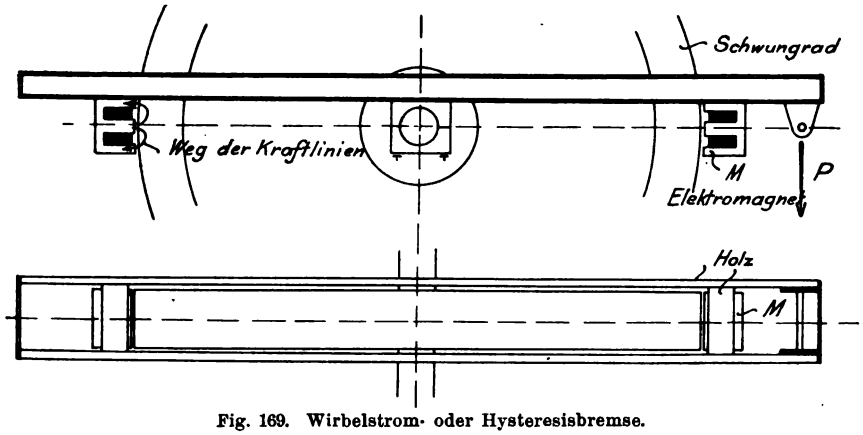


Fig. 169. Wirbelstrom- oder Hysteresisbremse.

Solche Wirbelstrombremse ist sehr bequem zu bedienen und gut brauchbar für mäßige Leistungen oder bei kurz dauernden Versuchen. Für längere Versuche mit größerer Leistung macht die Abführung der erzeugten Wärmemenge Schwierigkeiten: Wasser gegen das Schwungrad gespritzt wird abgeschleudert und verunreinigt das Lokal. Beim einfachen Zaum liegt das Schwungrad nicht so frei. Die Temperatur des Rades steigert sich dann weiter, als mit der Betriebssicherheit gußeiserner Scheiben verträglich ist.

Ist die Scheibe, in der die Wirbelströme entstehen, aus Kupfer oder Messing, so ist die Bremse eine reine Wirbelstrombremse. Ist sie dagegen aus Eisen, so werden die am Magneten vorbeilaufenden Teile selbst magnetisiert werden, und durch die dauernde Ummagnetisierung werden Hysteresisverluste entstehen; die Bremse ist dann teilweise oder überwiegend eine *Hysteresisbremse*. Das macht sich wie folgt kenntlich: der Energieverlust durch Wirbelströme wächst mit dem Quadrat der Umlaufzahl, der durch Hysteresis ist proportional der Zahl der Ummagnetisierungen, also proportional der Umlaufzahl. Das bei wechselnder Umlaufzahl erzeugte Drehmoment wird also bei einer reinen Wirbel-

strombremse proportional der Umlaufzahl sein, bei einer reinen Hysteresisbremse wird es konstant, unabhängig von der Umlaufzahl sein. Wir werden sogleich sehen, daß letzteres oft unerwünscht ist. Man könnte wohl die Hysteresis vermindern durch Verwendung eines sehr weichen Eisens, auch wohl von Gußeisen, außerdem dadurch, daß man die Pole der Magnete, anders als in Fig. 169, so legt, daß kein Teil des Rades ummagnetisiert wird, sondern daß die Magnetisierung immer nur von neutral bis Nord, an anderen Stellen von neutral bis Süd geht; dazu müßten die Pole der Magnete in axialer Richtung aufeinanderfolgen. —

Über das *Zusammenarbeiten der Bremse mit der abgebremsten Kraftmaschine* ist folgendes zu beachten:

Die Bremsdynamometer verhalten sich verschieden bei Schwankungen der Umlaufzahl. Die einen erzeugen ein von der Umlaufzahl im wesentlichen unabhängiges Drehmoment, es sind das diejenigen, die die Reibung fester Körper benutzen, Zaum, Band und Seilbremse, auch, wie wir schon soeben erwähnten, die Hysteresisbremse. Bei den Flüssigkeitsbremsen, bei der Wirbelstrombremse und bei der weiterhin zu besprechenden elektrischen Bremsung mittels Dynamomaschine vermehrt sich mit zunehmender Umlaufzahl auch das Drehmoment, es wächst bei den Flüssigkeitsbremsen sogar etwa mit dem Quadrat der Umlaufzahl.

Ähnliche Unterschiede finden wir, nur im umgekehrten Sinne, bei den Kraftmaschinen. Wenn wir von der Einwirkung des Reglers zunächst absehen, so erzeugen die Dampfmaschinen, auf konstante Füllung eingestellt, bei allen Umlaufzahlen etwa das gleiche Drehmoment, ebenso Gasmaschinen und andere Kolbenmaschinen. Die Folge davon ist, daß eine Dampfmaschine durchgeht, wenn das widerstehende Drehmoment kleiner ist als das von ihr erzeugte, und daß sie im entgegengesetzten Fall stehen bleibt. Danach könnte man nun eine Kolbenmaschine nicht mittels Zaumes oder einer gleichwertigen Bremse bremsen: sind beide Drehmomente, treibendes und widerstehendes, gerade miteinander abgeglichen, so läuft die Maschine ruhig weiter; die kleinste Änderung in der Anspannung des Zaumes läßt sie durchgehen oder bringt sie zum Stehen. Daß diese Verhältnisse nicht so kraß auftreten, liegt daran, daß, hauptsächlich infolge der Drosselung des Dampfes in den Zulaufkanälen, die Dampfmaschine doch ein mit wachsender Umlaufzahl langsam abnehmendes Drehmoment erzeugt. Daher ist der Beharrungszustand einer mit Zaum gebremsten Kolbenmaschine zwar kein ganz labiler, aber doch ein nicht sehr stabiler. Ein guter Regler zwingt überdies die Maschine, gleichmäßig zu laufen.

Bei anderen Kraftmaschinen nimmt das erzeugte Drehmoment mit wachsender Umlaufzahl rasch ab, so bei der Turbine, bei der bekanntlich das Drehmoment Null wird, wenn sie etwa die doppelte normale Umlaufzahl erreicht, noch stärker beim Nebenschlußelektromotor. Hier wird sich stets ein guter Beharrungszustand einstellen bei der Umlaufzahl, die dem von Zaum erzeugten Drehmoment entspricht.

Das Gesagte soll die Tatsache erklären, daß die Abbremsung von Kolbenmaschinen mittels Zaumes oder dergleichen oft Schwierigkeiten macht, wenn die Maschine nicht mit einem guten Regler versehen ist.

Die Umlaufzahl pendelt dann in weiten Grenzen auf und ab. Flüssigkeits- und Wirbelstrombremsen dagegen gestatten die Abbremsung jedes Motors.

Wir können diese Beziehungen in den vier Diagrammen, Fig. 170, graphisch darstellen. Man sieht in Fig. a, wie sich die beiden Linienzüge, die die Veränderung der Umlaufzahl mit dem Drehmoment darstellen, bei Dampfmaschine und Zaum unter spitzem Winkel schneiden, so daß kleinen Schwankungen des belastenden Drehmoments zwischen den Linien *1* und *2* große Schwankungen der Umlaufzahl der Dampfmaschine, von *3* bis *4*, entsprechen. In allen anderen Fällen, Fig. b bis d, liegen die Verhältnisse günstiger.

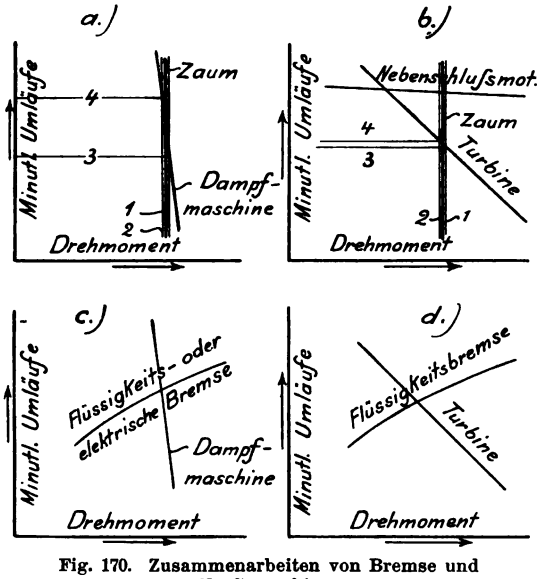


Fig. 170. Zusammenarbeiten von Bremse und Kraftmaschine.

Trotzdem werden im allgemeinen der einfache Pronysche Zaum, die einfache Bandbremse und vor allem die Seilbremse diejenigen Vorrichtungen bleiben, die man anwendet, wenn man eine Maschine ein einzelnes Mal abbremsen will — also in vielen Fällen der Praxis. Für den stationären Betrieb in Laboratorien und Prüffeldern sind die vollkommeneren Formen vorzuziehen.

77. Transmissionsdynamometer und entsprechende dynamometrische Meßmethoden. Bremsungen machen erhebliche Schwierigkeiten, sobald es sich um größere Drehmomente handelt, das heißt also, sobald größere Leistungen bei verhältnismäßig geringer Umlaufzahl zu bewältigen sind. Mit der Größe des Drehmomentes wachsen die Abmessungen der Bremse und der belastenden Gewichte und damit die Gefahren bei einem Bruch; insbesondere wird auch die Abführung der größer werdenden Wärmemenge schwierig; bei großen Leistungen und zugleich großer Umlaufzahl kann man Flüssigkeitsbremsen verwenden, bei denen die Wärme leicht abzuführen ist. Mit ihrer Hilfe hat man denn auch große Dampfturbinen abgebremst.

Bei großen Drehmomenten sind also Bremsungen schwer ausführbar. Sie haben außerdem immer den Nachteil, daß die abgebremste Energie verloren geht; das ist bei großen Leistungen eine Verschwendung. Auch kann man durch Bremsen nur das durchschnittliche Drehmoment feststellen, nicht aber die Schwankungen desselben während eines Umlaufes verfolgen. Außerdem kann man natürlich nur Kraftmaschinen ab-

bremsen, die Energie erzeugen; der Energieverbrauch von Arbeitsmaschinen indessen muß in einer Weise gemessen werden, die die Energie bestehen läßt, damit sie noch zum Antrieb dieser Maschinen dienen kann.

Transmissionsdynamometer sind besondere Apparate, die das durch sie hindurchgehende Drehmoment messen, ohne die Energie zu vernichten; sie werden dazu in den Lauf der Energieübertragung eingeschaltet, um die Messung auszuführen, und müssen nach ihrer Größe geeignet sein, die gesamte Energie durch sich hindurchzuleiten. Da bei großen Energiemengen die Beschaffung jeweils passender Dynamometer auf Schwierigkeiten stoßen wird, so wendet man in neuerer Zeit das Augenmerk auf solche *dynamometrische Meßmethoden*, die durch Anbau nur von Beobachtungseinrichtungen die durch die vorhandenen Bauteile hindurchgehenden Drehmomente messen. Einige Formen lassen auch die Schwankungen des Drehmomentes im Verlauf einer Umdrehung erkennen.

Die Transmissionsdynamometer messen wie die Bremsdynamometer zunächst nur das Drehmoment. Um die hindurchgehende Energie (Arbeit oder Leistung) zu finden, bleibt stets noch die Umlaufzahl zu beobachten.

Eine Gattung von Transmissionsdynamometern, die wir als *Getriebedynamometer* bezeichnen können, untersuchen die Kräfte in einem Zahnrad- oder Riemenbetrieb und messen dadurch das durch dieses Getriebe übertragene Drehmoment.

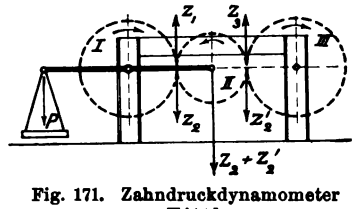
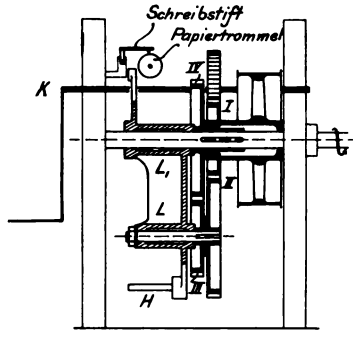


Fig. 171. Zahndruckdynamometer von Kittler.

Die wichtigsten unter ihnen sind die *Zahndruckdynamometer*. Fig. 171 diene namentlich dazu, ihr Prinzip zu erläutern. Die zu messende Energie wird der Welle eines Zahnrades I durch Riemenscheibe zugeführt und der Welle des Zahnrades III durch Riemenscheibe entnommen. Die Zahnräder *I* und *III* sind im Gestell, *II* ist in einem Wagebalken gelagert, im Leerlauf ist der Wagebalken austariert. Geht nun ein Drehmoment von *I* nach *III* durch *II* hindurch, und erfolgt der Umlauf der Räder im Sinn der Pfeile, so entstehen an den Zähnen die Zahndrucke Z_1 und Z_2, Z_2' und Z_3 in der gezeichneten Richtung. Am treibenden Rad *I* muß der Zahndruck Z_1 der Bewegung entgegenwirken, er stellt den Widerstand dar, den das Rad erfährt; am getriebenen Rad *II* wirkt Z_2 in Richtung der Rotation, er treibt das Rad an. Beim Räderpaar *II—III* ist *II* das treibende, *III* das getriebene, also muß an *II*, der Bewegung entgegen, Z_2' abwärts wirksam sein. Am Rad *II* greifen also beide Kräfte, Z_2 und Z_2', abwärts an, die Summe $Z_2 + Z_2'$ kann man also bei *P* messen. Übrigens ist auch noch, wenn wir von dem kleinen Verlust durch Reibung in der Lagerung des Rades *II* absehen, $Z_2 = Z_2' = Z$; bei *P* messen wir also $Z_2 + Z_2' = 2Z$. Ist r_3 der Radius des Rades *III* und n_3 seine Umlaufzahl, so ist die von dem Dynamometer abgegebene Leistung in Pferdestärken: $N = \frac{2\pi r_3 n_3 Z}{60 \cdot 75}$. — Die Teilkreise der Räder *I—II* haben nur die richtige Lage zueinander, wenn der Wagearm ausgeglichen

ist. Man muß deshalb Evolventenverzahnung anwenden. Das Dynamometer läuft trotzdem leicht unruhig.

Wertvoller ist das *Zahndruckdynamometer von Amsler-Laffon* (Fig. 172). Von der Kurbel K oder von der Riemenscheibe aus wird Zahnrad I angetrieben, das Drehmoment wird durch II und III hindurch auf Zahnrad IV und damit auf die Abtriebwelle übertragen. Dabei entstehen an den Zahnrädern die Zahndrucke Z_1 bis Z_4, ähnlich wie im vorigen Fall. Wir haben nun die Zahnräder $II-III$ zu betrachten, welche starr verbunden sind[1]) und deren Teilkreisradien r_2 und r_3 heißen sollen. In bekannter Weise denken wir zu Z_2 und Z_3 je zwei Kräfte gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung angebracht; es sind das die Kräfte Z_2' und Z_2'' einerseits, die Kräfte Z_3' und Z_3'' andererseits. Das Kräftepaar $Z_2 - Z_2'$ mit dem Arm r_2 und das Kräftepaar $Z_3 - Z_3'$ mit dem Arm r_3 ergeben die Drehung des Räderpaares $II-III$ mit einem Moment $Z_2 \cdot r_2 = Z_3 \cdot r_3$. Ferner bleiben die Einzelkräfte Z_2''



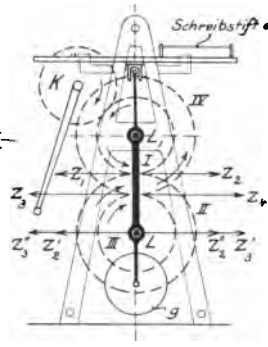


Fig. 172. Zahndruckdynamometer von Amsler-Laffon.

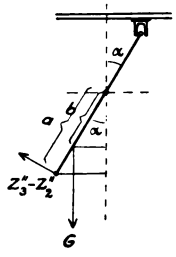


Fig. 173.

nach rechts wirkend und Z_3'' nach links wirkend, die in L angreifen. Da nun das Lager L beweglich ist, es befindet sich in einem bei L_1 aufgehängten Gehänge, so wird dieses in der rechten Figur schwarze, in der linken schraffierte Gehänge aus seiner Mittellage treten, so lange, bis in schräger Lage sein Eigengewicht G der Differenz $Z_3'' - Z_2''$ das Gleichgewicht hält. Das tritt ein, wenn in Fig. 173 ist: $G \cdot b \cdot \sin\alpha = (Z_3'' - Z_2'') \cdot a$. Also ist $\sin\alpha = \text{konst.}\,(Z_3'' - Z_2'')$: der Sinus des Neigungswinkels ist der Differenz $Z_3'' - Z_2''$ proportional. Nun ist noch

$$\text{wegen } Z_2'' \cdot r_2 = Z_3'' \cdot r_3, \text{ auch } Z_3'' - Z_2'' = \frac{r_2 - r_3}{r_3} \cdot Z_3 = \text{konst.} \cdot Z_3 = \text{konst.} \cdot M_d.$$

Also sind auch die übertragenen Drehmomente M_d dem $\sin\alpha$ proportional.

Bei seiner Bewegung verschiebt das Gehänge LL_1 ein Lineal mit Skala, die vor einer festen Marke spielt. Damit auch die Ausschläge der Skala dem $\sin\alpha$ proportional, also die Skalenausschläge dem Drehmoment proportional werden, greift ein am Gehänge LL_1 sitzender Stift

[1]) Im folgenden sind zwei Fehler berichtigt, die sich in der Ableitung der ersten beiden Auflagen befanden.

in eine Gabel an dem mit Teilung versehenen Lineal (Fig. 173). Die Skaleneinteilung kann daher gleichmäßig sein.

An demselben Lineal ist auch ein Schreibstift befestigt, der auf umlaufender Papiertrommel den Verlauf eines wechselnden Drehmoments aufzeichnet; durch Planimetrieren des entstehenden Diagramms und Ziehen der Ausgleichlinie kann man das mittlere Moment finden. Die Papiertrommel wird von einer der Wellen aus angetrieben, so daß die ablaufende Papierlänge proportional der Wellengeschwindigkeit ist; daher stellen die Flächen unter dem aufgezeichneten Diagramm direkt die Arbeit dar; den Maßstab dafür kann man berechnen, wenn man den Maßstab der Wege und den Maßstab der Drehmomente empirisch feststellt, etwa zu 1 mkg = 10 mm und 1 Umlauf = 16,2 mm, worauf sich der Arbeitsmaßstab zu 162 qmm = 2 π mkg oder 100 qmm = 3,88 mkg ergibt.

Bringt man auf einen Haken H des Gehänges ein Zusatzgewicht g, so ändert sich der Wert eines Skalenteiles. Gehängegewicht und Zusatzgewichte sind so bemessen, daß dem Drehmoment 1, 2...mkg an der Abtriebwelle eine glatte Zahl der Skala entspricht.

Vor Benutzung eines Transmissionsdynamometers muß man seine *Eigenreibung* bestimmen oder eliminieren. Man mißt beim Amsler-Dynamometer nicht das Drehmoment in der Abtriebwelle, das man doch kennen will, sondern jenes in den Übertragungsrädern *II—III* des Gehänges. Dieses unterscheidet sich vom gesuchten Drehmoment (abgesehen vom Übersetzungsverhältnis der Zahnräder) um so viel, wie die Reibung in der Zahnräderübertragung ausmacht. Diese Reibung schwankt und wirkt immer der Bewegung entgegen, sie kann daher nicht ein für allemal ausgeglichen werden, weil ihr Sinn mit der Drehrichtung des Dynamometers wechselt. Schon wenn die Abtriebwelle ganz leer läuft, wird sich daher ein Ausschlag der Skala zeigen. Dieses Drehmoment der Eigenreibung muß man bestimmen und von jeder späteren Ablesung als Korrektion abziehen; oder man muß durch Anbringen passender Gewichte den Leerlaufausschlag ausgleichen, so daß das leer laufende Dynamometer auf Null einspielt. Daß das durch Reibung verloren gehende Moment bei allen Lasten das gleiche ist, ist eine nur annähernd zutreffende Annahme; besser ist es daher, das Dynamometer durch Abbremsen der Abtriebwelle mit wechselnden Drehmomenten direkt zu eichen. Bei der Eichung soll das Dynamometer mit der Umlaufzahl der späteren Benutzung laufen. Man hat sie vor jeder Benutzung zu wiederholen, weil die Reibung veränderlich ist.

Die von der Gewichtsbelastung herrührende Trägheit macht das Amsler-Dynamometer für Registrierung schnell schwankender Kräfte nicht geeignet.

Riemendynamometer werden kaum praktisch verwendet; in der Literatur finden sich viele beschrieben.

Getriebedynamometer (unter welchem Namen wir oben Zahndruck- und Riemendynamometer zusammenfaßten) verbrauchen Arbeit und sind daher der Abnutzung unterworfen. Die nun zu besprechenden

Wiege-Dynamometer verbrauchen nur in den Lagern Arbeit und sind daher der Abnutzung weniger unterworfen.

Bei *Wiegedynamometern* stellt man das durch einen Wellenzug gehende Drehmoment durch Auswiegen fest: man mißt die in gewissem Abstande von der Drehachse übertragene Umfangskraft nach einer der für Kräfte verwendbaren Meßmethoden; man kann dazu also Hebelanordnungen, hydraulische Messungen oder Federn verwenden. Die Schwierigkeit besteht sowohl in der Konstruktion des messenden Apparates, da es nötig ist, den Einfluß der Fliehkräfte auf die Meßeinrichtungen bei wechselnder Umlaufzahl zu beseitigen, vor allem aber darin, die Angaben trotz der Rotation des ganzen Systems nach außenhin kenntlich zu machen; dazu können mechanische und optische Einrichtungen dienen.

Mehrfach wird das *Fischinger-Dynamometer* verwendet; es beruht auf dem Prinzip der Hebelwage (Fig. 174 u. 175). Von den beiden Riemen-

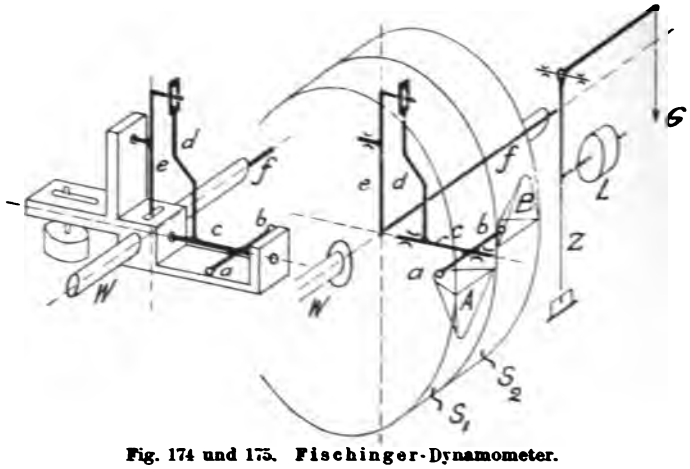


Fig. 174 und 175. Fischinger-Dynamometer.

scheiben S_1 und S_2, Fig. 174, dient eine zum Antrieb, eine zum Abtrieb durch Riemen. Beim Übergang von der einen Scheibe auf die andere soll das Drehmoment gemessen werden. Die Übertragung des Drehmoments geschieht durch den Hebel *a b*, der sich gegen Knaggen *A* und *B* in den beiden Riemenscheiben stützt, von der einen mitgenommen wird und seinerseits die andere mitnimmt. Dabei entsteht in der Welle *c* ein Drehmoment proportional dem zu messenden, und Hebel *d* macht einen kleinen Ausschlag bis an eine Hubbegrenzung. Dadurch wird unter Vermittlung des zweiarmigen Hebels *e* die Stange *f* in der hohlen Welle nach außen gestoßen. Man legt nun Gewichte bei *G* auf eine Wagschale, bis Stange *f* wieder einwärtsgepreßt wird, und dadurch das ganze Hebelsystem — das übrigens mitsamt den Riemenscheiben um Welle *W* rotiert — in seine Mittellage zurückkehrt. Dann zeigt Zunge *Z* wieder auf die Nullmarke. Die aufgelegten Gewichte sind nun ein Maß für das übertragene Drehmoment, und zwar wird

durch Ausprobieren die Wagschale so angebracht, daß 1 kg auf der Wagschale einer Umfangskraft etwa von 10 kg an den beiden (gleichgroßen) Riemenscheiben entspricht: Übersetzung 1 : 10. — Fig. 175 läßt erkennen, wie die Wägehebel *a b c d* einerseits, *e* andererseits in einem Armkreuz gelagert sind. Das Armkreuz ist fest auf der Welle *W*, die beiden Riemenscheiben sind lose darauf. Ein Gegengewicht dient zum Auswuchten der umlaufenden Massen.

Mit dem Laufgewicht *L* bringt man zunächst im Leerlauf den Zeiger zum Einspielen (Austarieren); das muß bei verschiedenen Umlaufzahlen immer neu gemacht werden, weil die Auswuchtung nie ganz vollkommen zu sein pflegt, und auch wohl aus den beim Amsler-Dynamometer genannten Gründen. Neben dieser Justierung ist es nützlich, gelegentlich auch beim Fischinger-Dynamometer eine Eichung auszuführen, indem man die Abtriebwelle abbremst.

Das Fischinger-Dynamometer ist ein Ausgleichinstrument und eignet sich deshalb wie auch wegen seiner großen Trägheit nicht zum Messen wechselnder Momente. —

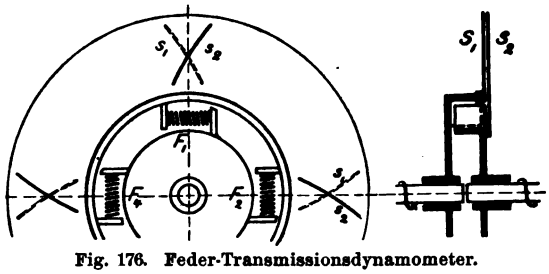


Fig. 176. Feder-Transmissionsdynamometer.

Ein Federdynamometer stellt Fig. 176 dar. Das Drehmoment soll von der einen Welle auf die andere gleichachsige übertragen und dabei gemessen werden. Die Übertragung geschieht durch die Federn F_1 bis F_4 hindurch. Deren Zusammendrückung, also die Verdrehung der Scheiben S_1 und S_2 gegeneinander, ist ein Maß des übertragenen Drehmoments. Diese Relativverdrehung wird nach außen kenntlich gemacht durch die Schlitze s_1 und s_2, durch die hindurch das Auge des Beobachters eine Lampe sieht: der Lichtschein wandert bei steigendem Drehmoment von innen nach außen. Man kann eine feststehende Skala vor dem Instrument anbringen.

Man kann auch eine Meßdose ähnlich wie die Federn der Fig. 176 einbauen, so daß die Umfangskraft auf sie wirkt, und die in ihr entstehende Spannung durch die hohle Welle und eine drehbare Stopfbüchse auch nach außen übertragen. Doch ist bei solchen *hydraulischen Dynamometern* schwer genügende Empfindlichkeit der Angabe und genügende Ausschaltung des Einflusses der Fliehkräfte zu erreichen.

Weniger primitiv als die bei Fig. 176 gegebene ist die optische Ableseeinrichtung bei Fig. 177. Hier wird eine einfache Welle als Meßfeder benutzt. In Fig. 177 überträgt die Welle *c* das zu messende Moment von *a* nach *b*. Sie dient als Meßfeder und kann unter Verwendung anderer Paßstücke *g h* gegen eine andere ausgewechselt werden. Die Scheiben *d* und *e* sind mit dem Ende *a* der Welle, die Scheibe *f* ist mit dem Ende *b* der Welle starr verbunden; so wird also *f* sich gegen *d* und *e* ebenso stark verdrehen wie die Wellenenden es gegeneinander tun; durch starre An-

schläge wird eine Überbeanspruchung der Welle verhütet, die natürlich ziemlich hoch beansprucht werden muß, um befriedigende Ausschläge zu bekommen. f trägt nun die Teilung $t\,t$, e trägt die Nonien n_1 und n_2, sämtlich aus Zelluloid gefertigt, so daß man die Ablesung durch die Öffnungen in der Scheibe d bewirken kann; die Lampe l beleuchtet sie dazu. Um aber das Bild von Teilung und Nonius auch im Gange der Maschine stillstehend erscheinen zu lassen, gibt es zwei Möglichkeiten. Die eine ist die Anbringung schmaler radialer Schlitze in den Öffnungen von d, durch die man die Teilung direkt betrachten kann. Es tritt dann die Wirkung des Stroboskops ein: man sieht die Skala so kurze Zeit, daß sie in dieser Zeit still zu stehen scheint. Eine Schwierigkeit liegt in der Erreichung genügender Lichtstärke, da die Lichtquelle, der geringen Spaltbreite wegen, nur schlecht ausgenutzt wird. Die andere Möglichkeit zur Festsetzung des Bildes ist in Fig. 177 dargestellt: ein Spiegel s ist unter 45° gegen die Achse geneigt und so angebracht, daß

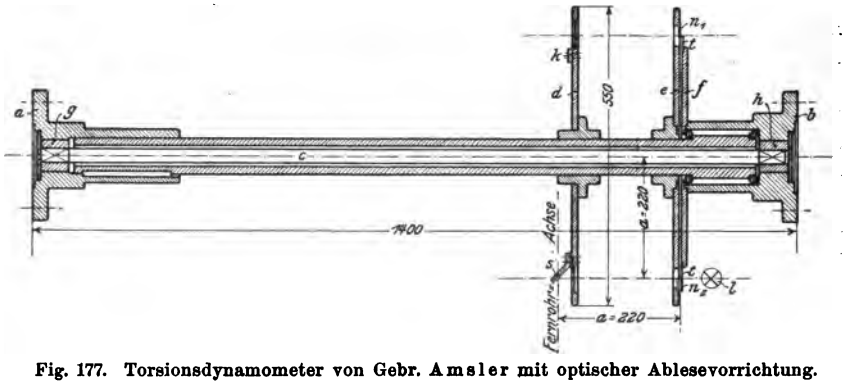


Fig. 177. Torsionsdynamometer von Gebr. Amsler mit optischer Ablesevorrichtung.

er gleich weit von der Achse und von der Skalenebene entfernt ist. Das virtuelle Bild der Skala fällt also in die Achse, wenn man mit einem senkrecht zur Achse stehenden Fernrohr auf den Spiegel blickt. Deshalb bewegt sich das Skalenbild bei der Drehung des Spiegels um die Achse nur sehr wenig, auch bei einer merklichen Breite des Spiegels, und man erreicht größere Lichtausbeute als bei stroboskopischer Ablesung. In beiden Fällen aber scheint bei genügender Tourenzahl das Bild dem Auge dauernd vorhanden zu sein, wegen der bekannten Nachwirkung auf die Netzhaut. k ist ein Ausgleichgewicht für die Masse des Spiegels, der sorgsam befestigt werden muß.

Bisher war immer angenommen, es könne an die Stelle, wo das Drehmoment zu messen ist, ein besonderes Dynamometer eingebaut und das Moment hindurchgeleitet werden. Oft ist es erwünscht oder nötig, den vorhandenen Zusammenhang der Bauteile bestehen zu lassen und an ihnen doch die Messung vorzunehmen. Man muß dann *eine Welle oder eine Kupplung als Meßfeder* nutzbar machen, was allerdings genügende Elastizität voraussetzt. Bei langen Wellen wird die Elastizität ausreichen. Man kann das Rohr der Fig. 177 einfach über die Welle

schieben, und es dazu etwa längs geteilt ausführen. Das für Schiffswellen bestimmte Föttinger-Dynamometer wirkt so und wird bald besprochen werden. Um aber z. B. die Arbeitsabgabe einer Dampfturbine an ihre Dynamo zu messen, müßte man meist die Kupplung zwischen beiden Maschinen weniger innig machen, etwa indem man die Kupplungsscheiben auseinanderdrückt und durch genau berechnete, hoch beanspruchte Bolzen verbindet. Für Bruchsicherung durch Anschläge wäre Sorge zu tragen.

Auch für die Ableseeinrichtung kann man Zwischenbauten an der Maschine selbst vermeiden durch Anwendung rein optischer Einrichtungen, etwa nach Fig. 178. Auf der Welle (oder auf den beiden Flanschen einer elastischen Kupplung) werden die total reflektierenden Prismen P_1 P_2 angebracht, die auch durch Spiegel ersetzt werden könnten, wenn man die Verschlechterung des Bildes durch deren doppelte Reflexion in den Kauf nehmen wollte. Durch die Prismen hindurch betrachtet man mit dem Fernrohr die Skala S. Eine Sammellinse ist so eingeschaltet, daß die Skala in ihrer Brennweite liegt und daß daher die später ins Fernrohr gehenden Strahlen zwischen den Prismen einen parallelen Gang haben. Die Prismenachsen müssen gut parallel und zur Wellenachse senkrecht ausgerichtet werden; für solche Arbeit ist das Gaußsche Fernrohrokular mit Beleuchtung des Fadenkreuzes das übliche Hilfsmittel[1]). Die ganze Anordnung hat dann Eigenschaften ähnlich denen eines Winkelspiegels oder -prismas: auch wenn die Welle sich dreht, scheint doch im Fernrohr die Skala still zu stehen, so lange sie überhaupt im Gesichtsfeld ist; das Fadenkreuz des Fernrohrs zeigt auf einen Skalenstrich, den man bei genügender Umlaufzahl der Welle dauernd erblickt. Sobald sich aber durch Torsion die Wellenquerschnitte A und B gegeneinander um den Winkel S verdrehen, ändert sich auch die Stellung der Prismen gegeneinander und das Fadenkreuz verschiebt sich auf dem Skalenbild um s Skalenteile. Dann ist $\operatorname{tg}\delta = \frac{s}{f}$ oder annähernd $\delta = \frac{s}{f}$ die Verdrehung der Welle für eine Meßlänge M. (Es kommt also auf die Brennweite f, nicht auf den Abstand a an.)

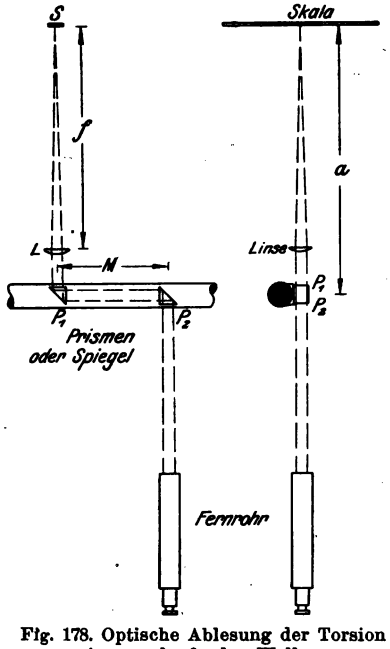


Fig. 178. Optische Ablesung der Torsion einer umlaufenden Welle.

[1]) Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. § 60. 10. Aufl. S. 254.

Welche Momente der Verdrehung um δ und damit dem Skalenwert s zugeordnet sind, ist durch vorgängige Eichung zu ermitteln. Gelegentlich wird sich eine Kupplung herausnehmen und auf besonderer Welle zusammenbauen lassen. Meist aber wird man versuchen, die Eichung an der eingebauten Welle zu machen, indem man ein Ende durch ein Klemmfutter an der Drehung hindert und das andere an bekanntem Arm durch Gewichte belastet. Man kann auch einen auf ein Wellenende geklemmten Arm auf eine Wage stützen, und durch Nachschrauben und Nachsetzen eines zweiten Armes das Moment erzeugen, das die Wage zu messen hat. Die Schwierigkeit ist es, Verbiegungen zu vermeiden, mit denen auch Bewegungen der Prismen verknüpft wären. Um die Reibung in den Lagerungen der Welle auszuschalten, hat man die Belastung einmal steigen, einmal fallen zu lassen, beidemal unter Vermeidung von Stößen, und die Mittelwerte der Ablesungen im Aufwärts- und Abwärtsgang zu nehmen — so wie das im allgemeinen für Eichungen in § 6 beschrieben ist.

Ob diese Methode, der sich ähnliche anreihen lassen[1]), für praktische Fälle brauchbar ist, z. B. um die Leistung von großen Turboaggregaten an der Kupplung mechanisch zu bestimmen, ist mir unbekannt. Ihre Durchbildung in diesem Sinne ist aber ein großes Bedürfnis und soll durch vorstehende Notizen angeregt werden.

Jedenfalls sind Methoden wie die beschriebenen nur brauchbar, wenn die Kraftlieferung auf der einen Seite, die Kraftabnahme auf der anderen Seite der Meßstelle gleichförmig sind, so daß auch die Torsion der Welle über den ganzen Umlauf konstant bleibt und ihre Messung in einem Punkt des Umfanges genügt. Das wird im allgemeinen bei Turbomaschinen der Fall sein, niemals bei Kolbenmaschinen. Aber auch bei Turbomaschinen ist z. B. die Möglichkeit der Resonanz zwischen der Eigenschwingungszahl der Welle oder Kupplung und der Schaufelzahl gegeben; periodische Schwankungen des übertragenen Drehmomentes werden dann eintreten; beim Schiffspropeller verursacht die Nähe der Wasseroberfläche periodische Änderungen des Momentes entsprechend der Flügelzahl des Propellers.

Diese Änderungen aufzuschreiben und dadurch sowohl die Ursache von Schwingungserscheinungen zu ermitteln als auch die übertragene Leistung zu finden, ist der Zweck des *Föttinger-Dynamometers*. Fig. 179 stellt dasselbe schematisch dar. Auf die Welle ist rechts das Meßrohr angeschraubt, das über die Welle hinläuft und in der Scheibe S_2 endet, dort übrigens noch einmal, jedoch drehbar, auf der Welle gelagert ist. Die Scheibe S_1 ist fest auf der Welle. Die Scheiben geben schon an sich die Verdrehung der Welle vergrößert wieder; eine weitere Vergrößerung findet durch einen Winkelhebel und einen Schreibhebel statt; an letzterem sitzt der Schreibstift, der nun parallel zur Wellenachse, allerdings auf einem Kreisbogen gehend, Bewegungen ausführt, die ein Maß für das Drehmoment sind. Der Schreibstift schreibt die Drehmomente auf einer mit Papier bespannten Schreibtrommel auf, die nicht mit umläuft,

[1]) Vieweg und Wetthauer, Zeitschr. f. Instrumentenkunde. Mai 1914.

sondern nur so weit seitlich verschiebbar ist, daß man sie zur Erneuerung des Papierblattes aus dem Bereich der umlaufenden Teile ziehen kann. Als Abszissen werden also ohne weiteres die von der Welle in der Gegend der Scheibe S_1 zurückgelegten Wege aufgetragen; die Fläche zwischen der Drehmomentenlinie und einer Nullinie, die ein besonderer Schreibstift jederzeit aufschreibt, wird also die bei einem Umgang gelieferte Arbeit darstellen. Die schematische Darstellung läßt eine Reihe notwendiger Einrichtungen nicht erkennen; so insbesondere eine Vorrichtung, die den Schreibstift im Gang der Welle auf die Trommel aufzusetzen und von ihr abzunehmen gestattet; das geschieht durch eine Schraubenspindel, deren Handrad bei jedem Umgang an einen Anschlag stößt und dadurch um einen Zahn geschaltet wird, vorwärts oder rückwärts, je nachdem welcher Anschlag angestellt ist; ähnliche Schaltwerke sind bei Zylinderbohrmaschinen für die Transportbewegung üblich. Die schematische Darstellung läßt auch nicht erkennen, daß zwei Schreib-

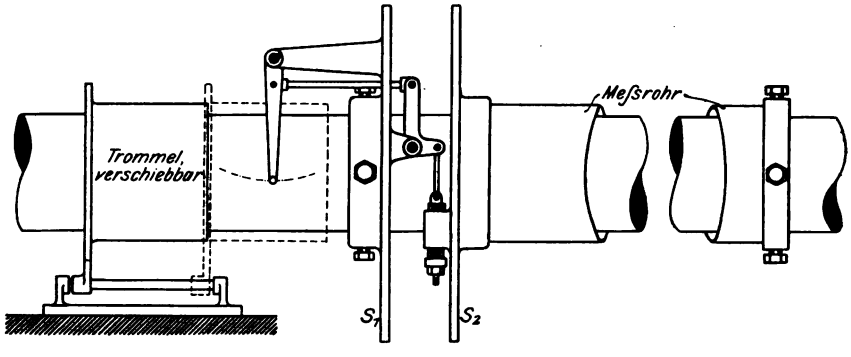


Fig. 179. Schema eines Föttinger-Dynamometers.

zeuge, ganz symmetrisch zueinander vor und hinter der Welle liegend, vorhanden sind.

Die Fläche unter der Drehmomentenlinie stellt die Arbeit dar, sofern die Ausschläge des Schreibstiftes dem Drehmoment proportional werden, und zwar nicht die Bogenausschläge, sondern deren Projektionen auf die Mantellinie der Schreibtrommel; diese Proportionalität läßt sich durch passende Anordnung der Übertragungshebel erreichen, da die Verdrehung der Scheiben B und C dem Drehmoment leidlich proportional ist. Der Maßstab, in dem die Momente aufgetragen sind, läßt sich bei kleineren Maschinen experimentell finden, indem man einen auf die Welle oder eine Kupplung gesetzten Arm bekannter Länge auf eine Wage drücken läßt — das Admissionsventil der Dampfmaschine wird dazu vorsichtig geöffnet, um das Moment zu erzeugen — und indem man zu gleicher Zeit die Größe des Moments und den Schreibstiftausschalg feststellt. Bei mehrtausendpferdigen Schiffswellen freilich, für die das Föttinger-Dynamometer besonders gebraucht wird, ist diese Messung nicht gut zu machen, und man pflegt den Maßstab der Aus-

schläge rechnerisch zu bestimmen. Die Winkelverdrehung eines Wellenstückes von der Länge l und dem Durchmesser d ist nämlich, wenn das Moment M_d tordierend wirkt, $\vartheta = \frac{M_d}{G} \cdot \frac{32}{\pi d^4} \cdot l$; hierin wird man den Gleitmodul G des Materials besonders bestimmen müssen — eine Aufgabe des Materialprüfungswesens —, wenn man nicht den für Schiffswellenstahl nach mehrfachen Versuchen sehr gleichmäßig zutreffenden Wert $G = 829\,000$ kg/qcm übernehmen will; dieser Wert gilt übrigens, wenn alle Angaben obiger Formel in Zentimetern gegeben sind, auch das Drehmoment in cm · kg. — Die gegenseitige Verschiebung der beiden Scheiben B und C im Abstande r von der Wellenachse ist dann $r \cdot \vartheta$, und diese Verschiebung wird durch das Gestänge entsprechend vergrößert. — Nachdem man den Maßstab der Drehmomente ermittelt hat, und da man den Akszissenmaßstab ohne weiteres kennt — die Diagrammlänge entspricht dem Drehwinkel 2π —, so kann man den Maßstab der Arbeiten wie beim Amslerschen Zahndruckdynamometer angegeben berechnen.

Im Föttinger-Dynamometer wird also die kraftübertragende Welle selbst als Meßfeder benutzt. Diese Meßfeder ist so kräftig, daß ihre Schwingungszahl wohl unter allen Umständen weit über den wesentlichen Schwingungszahlen liegt, die den Schwankungen des Drehmoments entsprechen. Ihre Dämpfung ist gering und rein molekular. Daher (S. 11) ist die Meßanordnung eine vorzügliche zur graphischen Aufzeichnung der Schwankungen des Drehmoments. Man kann daher nicht nur die Gesamtleistung der Maschine feststellen, sondern durch Untersuchung der Drehmomentenkurve die Ursache von Schwingungen ausfindig machen, die das Maschinengestell ergreifen und — bei Schiffsmaschinen — zu Schiffsschwingungen führen[1]). So hat es sich gezeigt, daß unter Umständen durch Auftreten von Resonanzerscheinungen das höchste in einer Welle auftretende Drehmoment ein Vielfaches des durchschnittlichen ist, und Wellenbrüche ließen sich daraus erklären, daß man die Wellen nur statisch und oft nur für das durchschnittliche Drehmoment berechnet. Wir verweisen auf die im Literaturverzeichnis angeführten Arbeiten von Frahm und Föttinger.

Die *Bedeutung der Transmissionsdynamometer* war früher eine geringere, als man nach der Literatur annehmen sollte: sie bieten ein besonders gutes Feld für die Erfindertätigkeit, weil sie Gelegenheit zu interessanten, aber selten praktisch brauchbaren Konstruktionen geben. In neuerer Zeit erst ist der Bedarf nach einem für große Leistungen brauchbaren Dynamometer aufgetreten und im wesentlichen durch das Föttinger-Dynamometer befriedigt worden. Der Bedarf trat dadurch

[1]) Man hätte dazu die Koeffizienten der Fourierschen Reihe zu ermitteln, durch die man die Drehmomentenkurve darstellen kann; die Ermittlung dieser Koeffizienten kann etwa mit dem *harmonischen Analysator* von Mader geschehen, auf dessen Vorhandensein hier nur aufmerksam gemacht werden soll. (Vgl. Elektrotechn. Z. 1909, Heft 36, sowie des Verfassers Aufsatz über Wirkungsweise der Windkessel von Kolbenpumpen in der Z. d. V. D. I. 1911, S. 842, oder Forschungsarbeiten Heft 129).

ein, daß man Dampfturbinen nicht indizieren kann, und daß daher in Fällen, wo z. B. als Schiffsmaschine die Dampfturbine nicht zum Antrieb einer Dynamomaschine dient und eine elektrische Leistungsmessung unmöglich ist, überhaupt kein anderer Weg für die Untersuchung der Maschine im praktischen Betriebe besteht außer der Anwendung des Föttinger-Dynamometers oder ähnlicher Einrichtungen.

78. Bestimmung der Leistung aus dem Rückdruck. Statt durch Abbremsen einer Kraftmaschine das Drehmoment zu bestimmen, das die Maschine auf ihre Welle ausübt, kann man umgekehrt den Rückdruck bestimmen, den das Maschinengestell durch die Reaktion der arbeitaufnehmenden Teile erfährt. Dazu ist dieser Rückdruck, der im allgemeinen durch das Fundament aufgenommen wird und daher der Messung nicht zugänglich ist, meßbar zu machen, indem man das ganze Maschinengestell pendelnd aufhängt und mit einem Arm bekannter Länge zur Messung des Drehmomentes versieht.

Da Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sind, so mißt man am Gestell grundsätzlich dasselbe Moment, das man auch beim Bremsen der Welle mittels des Zaumes messen würde. Die beiden Momente unterscheiden sich lediglich um die mechanischen Verluste, die die beiden gegeneinander bewegten Teile aufeinander ausüben, die wir als Ständer und als Läufer bezeichnen können. Diese Verluste werden im allgemeinen von zweierlei Art sein: zunächst die Reibungsverluste in den Lagerungen des Läufers im Ständer, die wir mit R_1 bezeichnen wollen, ferner ein Teil V der Ventilationswiderstände, die der Läufer bei seiner Bewegung in der Luft erfährt. Die Reibungsverluste treten unverkürzt in den Ständer über, die Ventilationsverluste indessen nur so weit, als die vom Läufer angeregten Luftströme den Ständer treffen und an ihm gebrochen werden. Selbst bei einer gekapselten Maschine würde das von den Luftbewegungen auf den Ständer ausgeübte Moment kleiner sein als dasjenige, das der Läufer zur Erzeugung der Luftströmungen aufgewendet hat, entsprechend dem Energiebetrag, der durch Wirbelungen auf dem Wege der Luft vom Ständer zum Läufer verloren geht. Dieser Wirbelungsverlust ist auch bei ungekapselten Maschinen vorhanden; hinzu kommt bei ihnen aber noch, daß ein erheblicher Teil der Luftströmungen den Ständer gar nicht trifft, so daß der Unterschied der beiden Momente entsprechend größer wird. Zu beachten ist noch der Widerstand, den die Aufhängung der Maschine bietet. Für die Aufhängung verwendet man Schneidenlagerungen oder heute meist Kugellaufringe. In beiden Fällen wird der Widerstand sehr klein. Wenn wir ihn immerhin mit R_2 bezeichnen, so müssen wir, um seinen Einfluß zu verfolgen, zwei Fälle unterscheiden: entweder wir stützen das ganze, aus Ständer und Läufer bestehende System an einer Stelle des Läufers, im allgemeinen also an seiner Welle. Dann hat R_2 stets gleichmäßig die Richtung entgegen dem Drehsinn des Läufers; der Ständer ist auf der Welle des Läufers dann seinerseits aufgehängt. Oder aber wir stützen den Läufer etwa dadurch, daß wir sein Lager, statt es fest mit dem Fundament zu verbinden, in einem Kugellaufring genügender Weite lagern, der erst seinerseits auf der Unterlage ruht. Dann pendelt der Ständer in dem fundierten

Lager, und der Läufer rotiert im Ständer. Da der Ständer pendelt, so werden in diesem Falle die Kräfte R_2 positive oder negative Vorzeichen haben, je nach der augenblicklichen Richtung der Pendelbewegung.

Die ganze Anordnung läßt sich nun verwenden sowohl für Kraft- als auch für Arbeitsmaschinen und schließlich auch für Verbindungen von beiden. Viel verwendet werden beispielsweise unter dem Namen von Pendeldynamos Anordnungen, deren eine Fig. 180 im Bilde zeigt. Ein Benzinmotor ist fest montiert. Er wirkt auf den Anker einer Dynamomaschine als den Läufer. Das *Gestell der Dynamomaschine* ist durch über seine Lager gezogene Kugelringe *pendelnd* aufgehängt, und die auf dasselbe wirkende Reaktion wird mit Hilfe von Gewichten gemessen. Das Ganze ist eine Bremseinrichtung, bei der die bremsende Wirkung ähnlich wie bei der Wirbelstrombremse auf elektrischem Wege erfolgt, während die Messung — im Gegensatz zu den Methoden des § 76 — auf mechanischem Wege wie beim Zaume stattfindet. Wenn wir das auf die Welle der Dynamo ausgeübte Moment, das wir zu kennen wünschen, mit M_e bezeichnen, das am Hebelarm gemessene Drehmoment aber mit M_d, so gilt, im übrigen unter Benutzung der schon gegebenen Bezeichnungen, die Beziehung

wenn der Ständer gestützt wird: $M_e = M_d + V + R_1 \pm R_2$,

wenn der Läufer gestützt wird: $M_e = M_d + V + R_1 + R_2$.

V bedeutet hierbei nur denjenigen Teil der Ventilationsverluste, der in früher besprochener Weise am Ständer gebrochen wird.

Wegen des wechselnden Vorzeichens von R_2 im ersten Fall ist die zweite Anordnung — Stützung des Läufers — vorzuziehen, es sei denn der Widerstand der Kugellagerung so gering, daß er überhaupt keine Rolles spielt. In jedem Fall aber wird man $V + R_1$, ev. $V + R_1 + R_2$ versuchsmäßig zu bestimmen haben, indem man die Dynamo mit gleicher Tourenzahl als Elektromotor leer laufen läßt. Es ist nämlich — wieder im Gegensatz zu den Methoden des § 76, bei denen man auch oft durch Leerlaufversuche die Eigenverluste der Dynamo bestimmt — in diesem Fall zu beachten, daß die gesamten rein elektrischen Verluste, insbesondere also die in Anker und Feld erzeugte Stromwärme keinen Einfluß auf die Meßergebnisse hat. Man wird also im Leerlauf den gleichen Verlust bestimmen, der auch bei Vollast vorhanden ist, wenn nicht etwa eine der folgenden Fehlerquellen merklichen Einfluß hat: nach dem Grade der Magnetisierung können bei mangelhafter Lagerung Verlagerungen des Läufers gegen den Ständer im axialen und im radialen Sinne eintreten; durch Erwärmung können Schwerpunktsverschiebungen des Ständers eintreten, weshalb also die Leerlaufsbestimmungen an der warmen Dynamo vorzunehmen sind; die Stromzuleitungen zum Ständer können sich verändern, weshalb die Zuführung am besten durch federnde Schienen erfolgt. — Hinsichtlich der statischen Verhältnisse gilt ähnliches wie auf S. 210 für den Zaum ausgeführt wurde. Die dort durch Federn zu erreichende feinstufige Regulierung der Belastung wird jetzt durch eine feinfühlige Regeleinrichtung im Feld oder im äußeren Stromkreis, z. B. einem Wasserwiderstand, erreicht. Für die Messung ist es

erwünscht, daß der Auflagerpunkt des Hebelarms in gleicher Höhe mit der Maschinenachse liegt, so daß eine geringe Hebung und Senkung desselben gegen die Mittellage keine Änderung der wirksamen Hebelarmlänge zur Folge hat. Außerdem muß der Schwerpunkt des Ständers wenig unter der Maschinenachse liegen.

Diese Bemerkungen sind sinngemäß auch auf die folgenden Anordnungen zu übertragen.

Besonders eigenartig wird die hier in Rede stehende Meßmethode nämlich erst dann, wenn man nicht das Gestell der besonderen, nur der Belastung dienenden Dynamo pendeln läßt, was im Grunde nur auf die

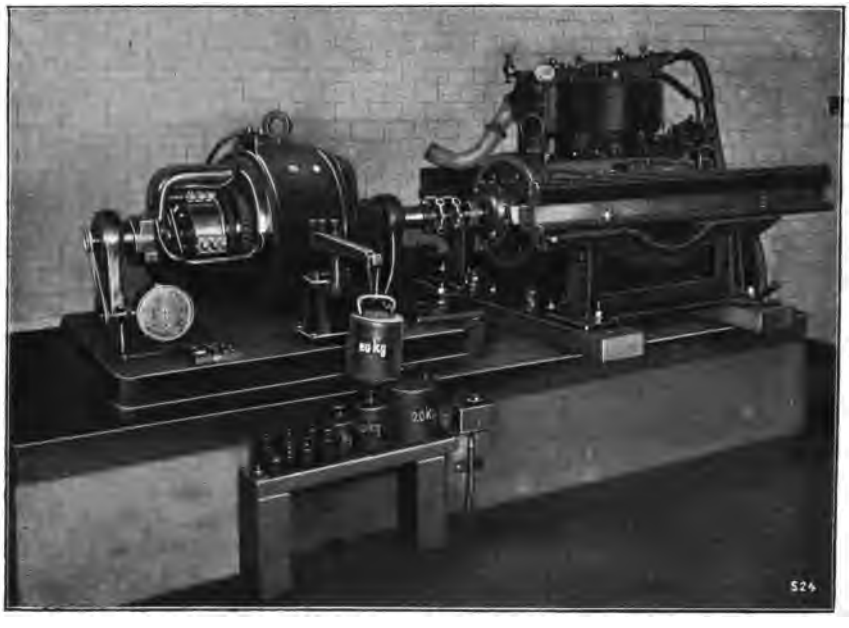


Fig. 180. Pendeldynamo von Dr. Max Levy.

gewöhnliche Bremsung herauskommt, sondern wenn man das *Gestell der zu untersuchenden Maschine* selbst *pendeln läßt*, in Fig. 180 also das Gestell des Fahrzeugmotors pendeln aufhängt. Wenn dabei an Kolbenmaschinen die pulsierend auftretenden Kräfte störend sind, so ist durch Anordnung genügend schwerer Massen dafür zu sorgen, daß der Ständer feststeht.

Grundsätzlich läßt sich die Anordnung auch an Stellen verwenden, wo ihre Anwendung nicht ganz nahe liegt. Zum Beispiel beim Peltonrad würde die Reaktion des Wasserstrahls das gewünschte Drehmoment ergeben; allerdings machte die Anordnung der Wasserzuführung (durch federnde Rohre) voraussichtlich einige Schwierigkeit. Wenn man als belastende Maschine in Fig. 180 statt der Dynamo eine Kreiselpumpe verwendet, deren Gestell man pendeln läßt, so hat man eine An-

ordnung, die viel Ähnlichkeit mit der Wasserbremse (§ 76) hat, sich immerhin grundsätzlich dadurch von ihr unterscheidet, daß das Gehäuse dauernd gefüllt bleibt und die Regelung durch Drosseln des Wasserablaufs, also durch künstliche Veränderung der Förderhöhe erfolgt. Die Vernichtung der Energie erfolgt also außerhalb der eigentlichen Bremse.

Die Methode ist auch für Arbeitsmaschinen anwendbar. Man kann den eine Werkzeugmaschine antreibenden Motor pendelnd lagern und erhält im *Pendelmotor* das Gegenstück zur Pendeldynamo. Man kann aber auch das Gestell der Arbeitsmaschine selbst pendeln lassen.

Zur Messung des Momentes sind wie beim Zaum Gewichte das auf die Dauer Genaueste. Laufgewichtswagen sind bequemer. Wo das Moment wechselt, muß es registriert werden. Man kann etwa eine Meßdose mit Registrierwerk ähnlich wie bei Fig. 152, S. 205 verwenden. Zu beachten ist, daß die Pendelausschläge des Ständers sehr klein sein müssen, da er meist erhebliche Masse haben wird, damit seine Massenwirkungen nicht zu groß werden.

79. Elektrische Leistungsmessung. Für die elektrische Leistungsmessung sind zwei Fälle möglich. Entweder es wird eine Arbeitsmaschine, sagen wir eine Pumpe, elektrisch angetrieben. Man entnimmt den Strom irgendeiner elektrischen Zentrale und mißt mittels Volt- und Amperemeters die Spannung und Stromstärke: beider Produkt ist die dem Elektromotor zugeführte Leistung. Kennen wir noch den Wirkungsgrad η des Elektromotors, so haben wir die der Pumpe zugeführte Leistung $N = N_{\text{mot}} \cdot \eta$.

Im anderen Falle wird eine Kraftmaschine, sagen wir eine Dampfturbine, elektrisch belastet. Die von ihr erzeugte Energie wird nicht durch Abbremsen in Wärme verwandelt, sondern durch eine Dynamomaschine in Elektrizität umgesetzt. Der erzeugte Strom wird nach Spannung und Stromstärke festgestellt: beider Produkt ist die elektrische Leistung der Dynamomaschine. Die Effektivleistung der Dampfturbine war etwas größer, sie ist $N = \frac{N_{\text{dyn}}}{\eta}$, wenn η der Wirkungsgrad der Dynamomaschine.

In beiden Fällen hat man, Gleichstrom vorausgesetzt, die Spannung E in Volt an einem Voltmeter und die Stromstärke J in Ampere an einem Amperemeter abzulesen; das Produkt beider Ablesungen ist die elektrische Leistung in Watt. Teilen wir das Produkt durch 1000, so erhalten wir die elektrische Leistung in Kilowatt, teilen wir es durch 735,8 $\sim$ 736, so erhalten wir die elektrische Leistung in Pferdestärken.

Es ist also

$$N_{\text{el}}^{\text{KW}} = \frac{E \cdot J}{1000}; \qquad N_{\text{el}}^{\text{PS}} = \frac{E \cdot J}{736} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Bei Wechsel- oder Drehstrom wird die elektrische Leistung direkt mittels eines Wattmeters zu bestimmen sein; bei Drehstrom mit ungleicher Belastung der Phasen ist die Aronssche Zweiwattmetermethode anzuwenden. Ungleiche Phasenbelastung wird insbesondere bei Be-

lastung mittels Wasserwiderstandes kaum zu vermeiden sein. Zur Einstellung einigermaßen gleicher Belastung ist der Einbau von Amperemetern in allen Phasen sehr bequem. — Die Angaben des Wirkungsgrades beziehen sich auf eine bestimmte Fasenverschiebung, oft auf $\cos\varphi = 0{,}8$. Wasserwiderstände aber ergeben keine Phasenverschiebung. Man läßt deshalb zweckmäßig einige Elektromotoren genügender Größe mitlaufen, die im Leerlauf sehr große Phasenverschiebung haben. Übrigens machen zu hohe Werte von $\cos\varphi$ nur unerhebliche Änderungen im Wirkungsgrad der Generatoren, etwa 1% beim Übergang von $\cos\varphi = 0{,}8$ bis $\cos\varphi = 1$ und zwar im Sinne einer Verbesserung des Wirkungsgrades. Ihre Nichtbeachtung bedeutet also bei Abnahme einer Kraftmaschine mit Generatorbelastung eine kleine Konzession des Abnehmers an den Lieferer.

Den Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen wird man oft aus Angaben der liefernden Fabrik kennen; wie er andernfalls zu bestimmen ist, soll hier, als in die elektrotechnische Meßkunde gehörig, übergangen werden[1]). Eine Messung der Umlaufzahl ist für die Leistungsbestimmung nicht nötig.

Hinsichtlich der Schaltung der Meßinstrumente und der elektrischen Maschine ist zu beachten, daß sie so zu geschehen hat, wie bei Angabe des Wirkungsgrades vorgesehen war. Nach den Normalien[1]) ist daher die im Feld und dem Feldrheostaten verlorene Energie als Verlust in Rechnung zu setzen. Man hat das Amperemeter also so anzuschließen, daß es den Erregerstrom mitmißt; kann man das bei fremderregten Dynamomaschinen nicht tun, so muß man die Erregungsenergie besonders messen und in Abzug bringen, bevor man durch den Wirkungsgrad dividiert. Der Verbrauch künstlicher Kühlung ist mangels anderer Vereinbarung in den Wirkungsgrad einzuschließen, d. h. als Verlust anzusehen.

80. Vernichtung der elektrischen Energie. In den Fällen der vorigen beiden Paragraphen sollte die zu messende Leistung in elektrische Form übergeführt werden. Der Unterschied war, daß in § 78 die Messung mechanisch, in § 79 jedoch ebenfalls elektrisch erfolgt. In beiden Fällen aber entsteht die Frage, was mit der erzeugten elektrischen Energie weiter wird.

Die Elektrizität ihrerseits muß nach der Messung vernichtet werden, wenn man sie nicht etwa in eine Sammlerbatterie oder in ein Beleuchtungsnetz hineingeben kann. Aber selbst wenn man solche nützliche Verwendung für sie hat, muß man gelegentlich einen Teil des Stromes vernichten, um dadurch die Möglichkeit zu haben, die Belastung der Maschine einzuregeln und konstant zu halten.

Vernichtung bedeutet Überführung in irgendeine unnütze Energieform, meist in Wärme, und geschieht in Belastungswiderständen. Diese bestehen aus einem Metallwiderstand, einer Glühlampenbatterie oder aus einem Wasserwiderstand.

---

[1]) Normalien zur Prüfung und Bewertung von elektrischen Maschinen und Transformatoren § 34 bis 44. Siehe z. B. in Streckers Hilfsbuch.

Einen Metallwiderstand kann man provisorisch aus Eisendrahtspiralen herstellen. Für seine Bemessung ist maßgebend, daß er einen bestimmten Widerstand haben muß, der, in Ohm gemessen, durch den Quotienten aus Spannung und Stromstärke gegeben ist. Außerdem muß die Drahtoberfläche groß genug sein, um die erzeugte Wärme abzugeben, ohne daß die Temperatur allzuweit steigt. Bei Eisendraht ist der Widerstand durch die Formel $W^{\text{Ohm}} = \frac{l_{\text{mtr}}}{10\, d^2_{\text{mm}}}$ gegeben, bei Manganin

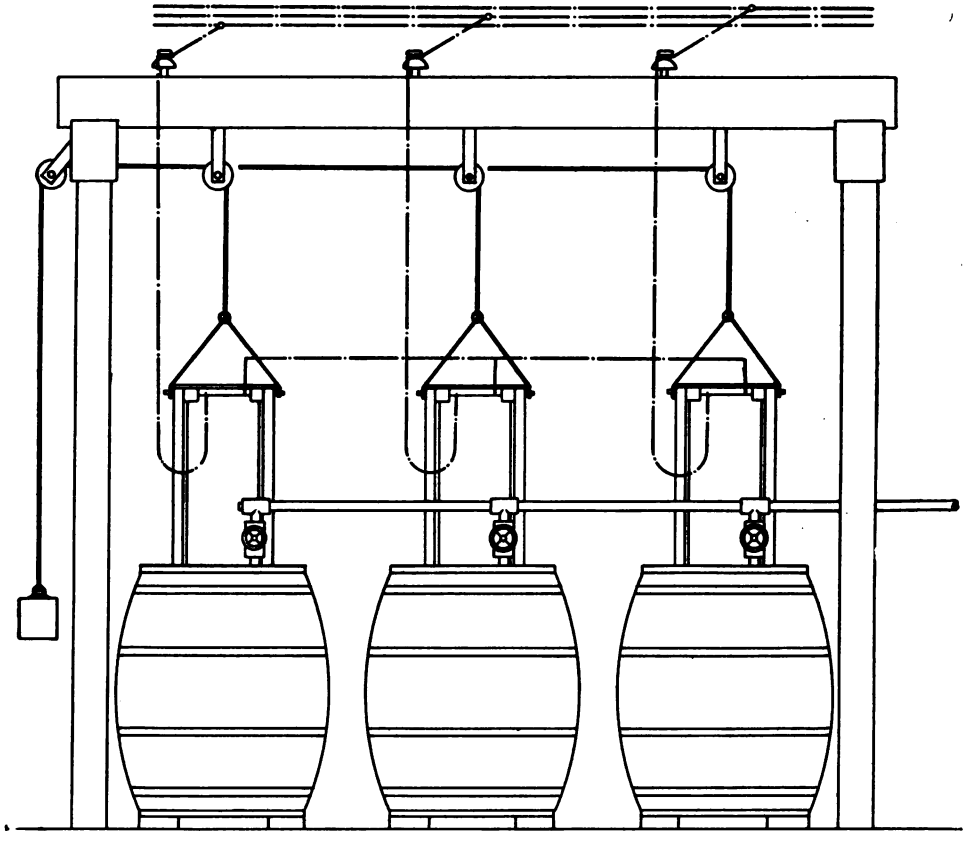


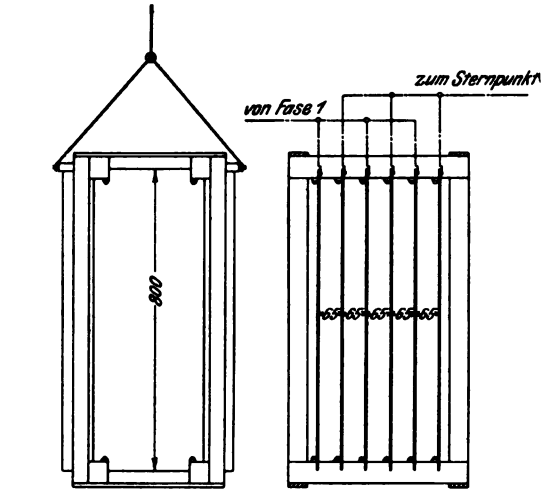
Fig. 181. Belastungswiderstand für Drehstrom.

ist $W = \frac{l}{1{,}8\, d^2}$; ein Quadratmeter strahlender Oberfläche kann etwa 10 PS bewältigen, bei guter Ventilation viel mehr, bei behinderter Strahlung jedoch weniger. Man schaltet nun so viel Leiter parallel, daß die nötige Stromstärke bewältigt werden kann, und regelt die Belastung durch Ausschalten von Leitern. Die Drähte können, wenn entsprechend montiert, ruhig rotwarm werden. Ganz praktisch ist es, ein wagerechtes

Eisenrohr mit Asbest zu umwickeln und darüber die weitgewundene Drahtspirale zu hängen.

Glühlampenwiderstände sind selten zu beschaffen. Von Glühlampen hat man so viel in Serie zu schalten wie der Spannung entspricht. Im übrigen schaltet man deren so viele parallel, daß die nötige Stromstärke erreicht wird.

Wasserwiderstände sind bequemer als Drahtwiderstände, die bei größeren Leistungen unhandlich werden; sie sind auch leichter herzustellen. Eisenbleche tauchen in Wasser, in das nach Bedarf zur Verringerung des Widerstandes etwas Soda eingestreut wird. Der Plattenabstand sollte etwa mit der zu vernichtenden Spannung zunehmen, die Plattengröße mit der Stromstärke. Man stellt eine Reihe von Platten parallel zueinander in Rillen eines Holztroges oder befestigt sie besser an Winkeleisen, die auf den Rändern des Troges aufliegen, und verbindet die Platten abwechselnd mit den beiden Polen; so werden beide Seiten der Platten ausgenutzt außer bei den äußersten. Für vorübergehende Zwecke kann man in eine große Öltonne, deren einer Boden entfernt wird, ein Bündel Blechplatten setzen, das man nach Fig. 182 mit einer Holzfassung versehen hat, die es zugleich beim Heben und Senken am Rande der Tonne zentrisch führt. Für Drehstrom braucht man dann 3 Tonnen; aus jeder derselben wird eine Reihe Bleche zu dem Sternpunkt geführt, die andere zu je einer der 3 Phasen (Fig. 181). Der Widerstand mit den angegebenen Abmessungen reichte bei 220 Volt Spannung zwischen 2 Fasen, also $220 : \sqrt{3} = 127$ Volt zwischen den benachbarten Platten, bequem für Stromstärken von 650 Ampere in jeder Phase aus, entsprechend einer Leistung von 240 KW in den drei Tonnen. Der Wasserzusatz (1 cbm/st für jede Tonne) diente dabei wesentlich nur zum Ersatz des verdampften, und um die Verdampfung nicht so stark werden zu lassen, daß das Wasser zwischen den Platten auskocht. Mit einem Quadratmeter Plattenfläche bewältigt man also 350 bis 500 Amp., d. h.



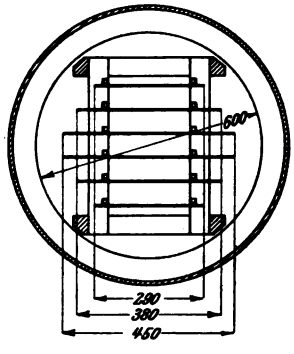


Fig. 182.
Plattenbündel aus Fig. 181.

für diese Stromstärke ist ein Quadratmeter positiver und eines negativer Platte nötig, wobei jedoch, sofern beide Seiten einer Platte ausgenutzt werden, auch beide einzeln in Rechnung zu setzen sind: eine Platte von 50 × 100 cm Abmessung kann, wenn beide Seiten ausgenutzt sind, 350 bis 500 Ampere leiten. Zum Regulieren der Stromstärke hebt man die Platten nach Bedarf aus dem Wasser. Noch energischer reguliert man durch Veränderung der Konzentration der Sodalösung; tut man Soda hinzu, so steigt die Stromstärke.

81. Ermittlung von Kraft und Drehmoment aus Beschleunigungsverhältnissen, insbesondere zur Bestimmung von Eigenverlusten. Die Ermittlung von Kräften kann unter Benutzung der allgemeinen Beschleunigungsgleichungen geschehen. Wenn man die von einem Körper zu verschiedenen Zeiten t zurückgelegten Wege s beobachtet, so ist durch Ableitung der beobachteten Beziehung die Geschwindigkeit $\frac{ds}{dt} = w$ zu ermitteln — die man gelegentlich wohl auch direkt beobachten kann; durch Ableitung der Beziehung zwischen w und t erhält man die Beschleunigung $\frac{dw}{dt} = p$, aus der die auf den Körper wirksame Gesamtkraft P durch Multiplizieren mit seiner Masse $m = \frac{G}{g} = \frac{G}{9{,}81}$ zu finden ist. Es ist $P = m \cdot p$. So könnte man die von einer Lokomotive ausgeübte Zugkraft im Anfahren ermitteln, hätte allerdings die Zugwiderstände zu berücksichtigen; da gerade letztere unbekannt sein werden, so wird man eher in die Lage kommen, aus der Verzögerung des Zuges in der Ebene nach Abstellen des Dampfes die Widerstände zu finden (Auslaufversuch).

Häufiger als bei *fortschreitender Bewegung* die Kräfte wird man bei *umlaufender Bewegung* die Drehmomente zu ermitteln haben. Wenn man die zu bestimmten Zeiten t zurückgelegten Umläufe s beobachtet, so ist durch Ableitung der beobachteten Beziehung die Umlaufgeschwindigkeit $\frac{ds}{dt} = \omega$ zu finden; man erhält sie in technischen Einheiten, kann sie aber nach S. 72 leicht in minutliche Umläufe umrechnen; gelegentlich kann man sie auch direkt mittels Tachometers beobachten; meist aber wird das ungenauer. Durch Ableitung der Beziehung zwischen ω und t erhält man die Winkelbeschleunigung $\frac{d\omega}{dt}$, aus der das auf die umlaufenden Massen wirkende Gesamtdrehmoment M_d durch Multiplizieren mit dem Trägheitsmoment J_m der Massen in bezug auf die Rotationsachse zu finden ist. Es ist $M_d = J_m \cdot \frac{d\omega}{dt}$.

Bei diesen Untersuchungen kommt es also in jedem Fall auf Differentiation von Beziehungen hinaus, die entweder mechanisch aufgezeichnet sind oder zahlenmäßig punktweise vorliegen. Außerdem ist bei fortschreitender Bewegung die Masse des Körpers durch einfaches Wägen, bei umlaufender Bewegung sein Massenträgheitsmoment $J_m = \int dm \cdot r^2$

zu ermitteln, wobei r den Abstand der Massenelemente dm von der Rotationsachse bedeutet. Es sei noch daran erinnert, daß man J_m nicht verwechseln darf mit dem Gewichtsträgheitsmoment $J_g = \int dG \cdot r^2$; wegen $G = g\,m$ ist auch $J_g = g \cdot J_m = 9{,}81\,J_m$.

Die *Ermittlung von Trägheitsmomenten* geschieht entweder durch Zerlegen des umlaufenden Profiles in Lamellen und rechnungsmäßiges Bilden der Produkte $G \cdot r^2$ für jeden der abgeteilten Kreisringe; bei Schwungrädern liefert der Kranz naturgemäß den größten Beitrag. Uns interessiert eher die Möglichkeit der Bestimmung des Trägheitsmomentes durch Versuche, und zwar meist durch Pendelversuche. Die Dauer t_s einer vollen (Doppel-) Schwingung eines physikalischen Pendels vom Trägheitsmoment J_m und vom Gewicht G, dessen Schwerpunkt um e von der Drehachse absteht, so daß also bei einer Ablenkung um 90° aus der Ruhelage das Moment $M_1 = G \cdot e$ die Rückführung erstrebt, ist nämlich (bei kleinen Ausschlägen):

$$t_s = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_m}{G \cdot e}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_m}{M_1}};$$

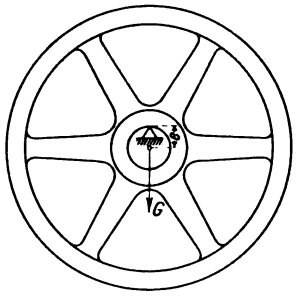
also ist

$$J_m = \frac{t_s^2}{4\pi^2} \cdot G \cdot e = \frac{t_s^2}{4\pi^2} \cdot M_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Durch Beobachtung der Schwingungsdauer läßt sich daher das Trägheitsmoment finden, da man auch entweder G und e oder gleich M_1 meist messen kann. — Ausgewuchtete Räder muß man erst in ein physikalisches Pendel verwandeln, indem man sie entweder nach Maßgabe von Fig. 183 und 184 auf einem Winkel- oder Rundeisen lagert; dann ist e ohne weiteres bekannt, und G muß ausgewogen werden. Das nach Formel (8) errechnete Trägheitsmoment ist das in bezug auf die Aufhängungsachse; es ist um $\frac{G}{g} \cdot e^2$ zu vermindern, will man das Trägheitsmoment in bezug auf die Radachse erhalten. Oder man bringt nach Fig. 185 eine Zusatzmasse G_1 exzentrisch an, worauf man das bei 90° Auslenkung entstehende Moment M_1 durch Umschlingen eines Fadens und Ausgleichen mit Hilfe von Gewichten G_0 findet (Fig. 186). Das Trägheitsmoment des Zusatzgewichtes in bezug auf die Umlaufachse, annähernd $\frac{G_1}{g} \cdot a_1^2$, ist abzuziehen, um das Trägheitsmoment der Scheibe allein zu erhalten. Die in Fig. 185 und 186 dargestellte Methode wird man nur bei Scheiben verwenden können, die beweglich genug gelagert sind, um bei kleinen Schwingungsweiten eine genügende Anzahl von Schwingungen zu geben, die also Kugellagerung oder eine sehr dünne Achse haben. In beiden Fällen ist genaue Auswuchtung der Scheibe für die Rechnung wesentlich; man muß sie durch Hilfsgewichte zunächst herstellen, kann aber auch bei der Methode Fig. 183 durch Aufhängung in zwei diametral entgegengesetzten Punkten, bei Fig. 185 durch Anwendung mehrerer Zusatzgewichte die Einflüsse mangelhafter Auswuchtung rechnerisch eliminieren. — Manche andere Anordnung

zur Ausführung der Schwingungsversuche ist denkbar. Gegenüber irgendwie komplizierten Anordnungen wird aber die Ermittlung durch Rechnung oft das bequemere sein.

Ein nach der zweiten Methode, Fig. 185, ausgeführter Versuch an einer in Kugellagern gelagerten Scheibe (über die auf S. 245 weiter berichtet wird) ergab folgendes: Mit einem Zusatzgewicht von 10,20 kg ergab sich die Dauer von 10 Schwingungen zu 82,0 sek, also $t_2 = 8{,}20$ sek. Beim Ausgleichen nach Fig. 186 ließ ein Ausgleichgewicht von 6,660 kg



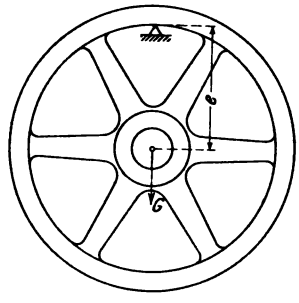


Fig. 183 und 184. Pendelversuch zur Bestimmung von Trägheitsmomenten.

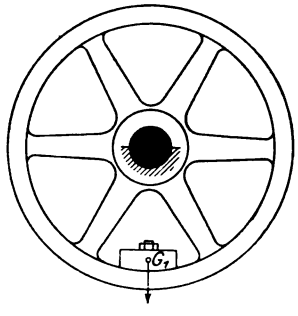


Fig. 185. Pendelversuch.

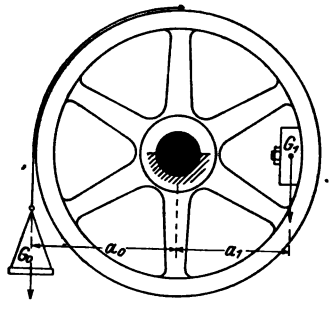


Fig. 186. Bestimmung des Schwerpunktsabstandes der Zusatzmasse.

das Rad noch gerade zurückfallen, während 6,700 kg es unter Überwindung der Lagerreibung vorwärts zogen; danach ist 6,68 kg das bei reibungsfreier Lagerung notwendige Ausgleichgewicht, das am Arm: Scheibenradius plus halbe Schnurstärke $= 0{,}500 + 0{,}0005 \sim 0{,}500$ m angreift; es ergibt sich $M_1 = 3{,}34$ m · kg und der Schwerpunktsabstand des Ausgleichgewichtes $a_1 = \frac{3{,}34}{10{,}20} = 0{,}328$ m. Das Trägheitsmoment der Scheibe einschließlich Zusatzgewicht ist also $J + J' = \frac{8{,}20^2}{4\,\pi^2} \cdot 3{,}34$ $= 5{,}71$; für das Zusatzgewicht ist $J' \sim \frac{10{,}2}{9{,}81} \cdot 0{,}328^2 = 0{,}112$; das Trägheitsmoment der Scheibe allein ist $J = 5{,}60$ m · kg · sek^2; die Benennung folgt aus der Beachtung der Dimensionen. —

Zum *Ermitteln des Differentialquotienten* einer graphisch vorliegenden Kurve kann man sich des *Spiegelderivators* bedienen, der in Fig 187 dargestellt ist. Ein kleiner ebener Metallspiegel S steht senkrecht auf der Kurve, wenn das Spiegelbild die stetige Fortsetzung der Kurve selbst bildet. Der Apparat hat zwei Spitzenfüße AB, die man auf eine Ordinate *3* einstellt, auf der man, vom Schnittpunkt mit der abzuleitenden Kurve aus, den halben Spitzenabstand beiderseits vorher abgestochen hat; ein dritter Fuß ohne Spitze ist im Bilde kaum zu sehen. Der an einem Arm sitzende Nonius N ist nun senkrecht zur Ordinate

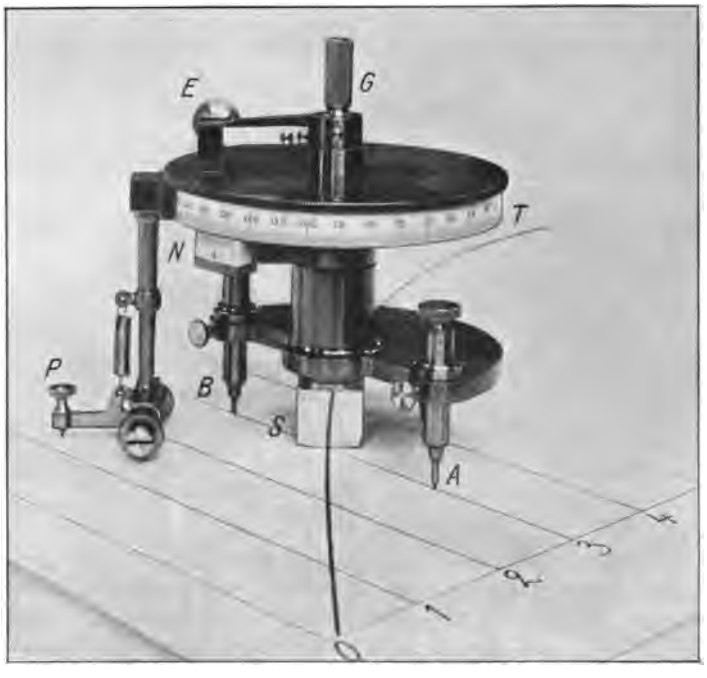


Fig. 187. Wagenerscher Spiegelderivator von Ernecke.

orientiert. Am Griff G kann man den Spiegel S, den Teilkreis T und die Punktiernadel P, die alle auf einer Achse sitzen, gemeinsam drehen, bis das Spiegelbild ohne Knick in die Kurve selbst übergeht. Dann kann man am Teilkreis und Nonius die Neigung der Kurve in der Ordinate *3* ablesen und unter Benutzung einer Tafel den Tangens finden, oder man kann durch Niederdrücken der Punktiernadel einen Stich machen, der die Richtung der Normale — bei anderer Justierung die der Tangente — festlegt. Mit Hilfe der Einstellvorrichtung E kann man den Spiegel etwas gegen den Teilkreis verdrehen, auch ist die Punktiernadel etwas seitlich verstellbar, so daß alle drei Teile in die richtige Lage zueinander zu bringen sind. Bei der Beschaffung des Spiegelderivators achte man darauf, daß der Nonius Zwölferteilung hat, da sonst die Tangens-Tafeln unbequem zu verwenden sind.

Ein einfacheres Instrument zu gleichem Zweck ist das *Spiegellineal*, Fig. 188; ein sauber gehobeltes Metallstück ist an einem Ende hochglanzpoliert, dieser Teil dient als Spiegel zum Einstellen in die Normale; das übrige dient als Lineal zum Zeichnen der Normalen. Der Winkel oder sein Tangens muß nun irgendwie ermittelt werden, am einfachsten nach Fig. 189: in bestimmtem Abstand a von der Abszissenachse XX ist eine Parallele X' zu ihr gezogen; wenn in den Punkten A, A_1... der Kurve die Normalen mittels des Spiegellineals — oder sonstwie — gezeichnet sind, so werden die Neigungswinkel der Kurve in A, A_1... bei φ, φ_1 erscheinen, und ihre Tangenswerte werden durch $\frac{DC}{a}, \frac{D_1C_1}{a}$... gegeben sein. Durch Ziehen zahlreicher Normalen und Abmessen der starkgezeichneten Subnormalen kann man also die Kurve ableiten. Gegenüber der Anwendung des Spiegelderivators besteht hier die Schwierigkeit, daß man nur schwer die Normale in bestimmten Punkten finden kann. Außerdem entsteht schnell ein Gewirr von

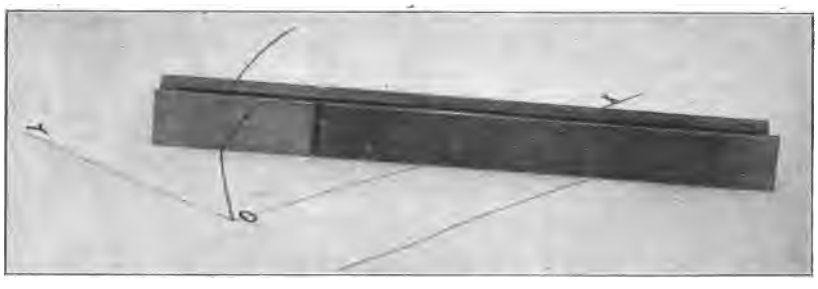


Fig. 188. Spiegellineal.

Strichen, deren Ausmessung schwer ist; man muß nämlich zahlreiche Punkte ableiten, da die Einstellung des Spiegels immerhin unsicher ist und daher eine graphische Fehlerausgleichung nötig wird; beim Derivator kann man in jedem Punkte erst mehrere Male den Winkel beobachten und nun rechnerisch die Mittelwerte bilden, die dann ohne weiteres eine glatte Kurve ergeben.

Die Einstellung des Spiegels ist besser zu machen bei schwach gekrümmten als bei Kurven von kleinem Krümmungsradius; bei einem bestimmten in der Ablesung enthaltenen Fehler wird der Fehler im Tangens am geringsten bei 45° Neigung der Kurve; er wird jedoch erheblich bei Neigungen unter 10° oder über 80°. Man wird Diagramme, die abgeleitet werden sollen, möglichst gleich diesen Tatsachen anpassen. Bei punktweise aufgezeichneten Kurven ist die Ableitung nicht in den Punkten, sondern immer mitten zwischen zweien zu machen; weicht die aufgezeichnete Kurve vom wahren Verlauf der Funktion ab, so wird sie selbst allerdings in den Punkten am genauesten sein, weil sich dort die (unbekannte) wahre Kurve und die aufgezeichnete schneiden; gerade deshalb aber wird der Fehler des Differentialquotienten in den Punkten am größten, zwischen beiden Punkten am kleinsten.

Als *Beispiel* sei die *Ermittlung der Eigenverluste einer Wirbelstrombremse* gegeben, die ähnlich wie Fig. 169, S. 220, gebaut war, an der jedoch die Magnete nicht auf das Schwungrad der Maschine wirken, sondern auf eine besondere und besonders gelagerte Scheibe. Da die Widerstände der besonderen Lagerung und auch der Widerstand, den die Scheibe in der umgebenden Luft erfährt, nicht von der Bremse gemessen werden, so sind sie zu der an der Bremse gemessenen Leistung hinzuzuzählen, um die Bremsleistung der Kraftmaschine zu erhalten. Es wurde ein Auslaufversuch gemacht: die Scheibe wurde bei abgenommener Bremse und abgekuppelter Kraftmaschine auf die höchste in Frage kommende Umlaufzahl gebracht und nun sich selbst überlassen. Da die Scheibe — deren Trägheitsmoment aus den S. 242 besprochenen Ermittlungen bekannt ist, $J = 5{,}60\ \mathrm{m \cdot kg \cdot sek^2}$ — in Kugellagern liegt, so läuft sie sehr

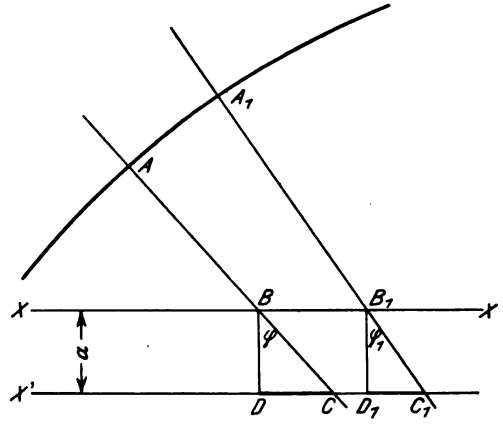


Fig. 189. Ermittlung des Tangens des Neigungswinkels.

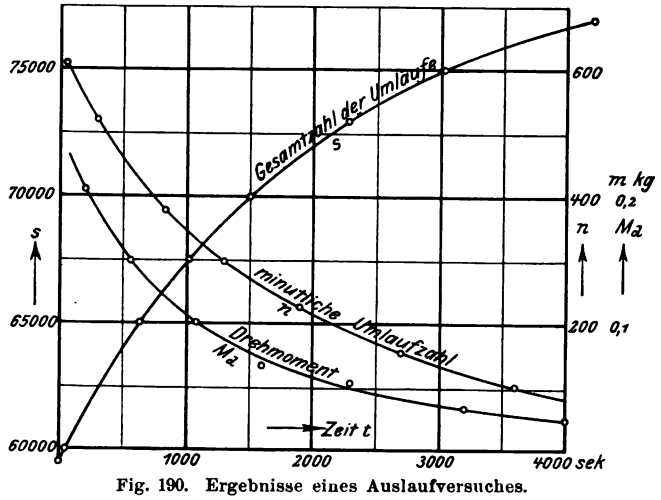


Fig. 190. Ergebnisse eines Auslaufversuches.

lange. Ein Zählwerk ist mit ihr verbunden. Als es auf 59 500 stand, wurde die Stechuhr gedrückt; dann wurden die in der s-Kurve der Fig. 190 durch Kreise angedeuteten Ablesungen gemacht und die s-Kurve aufgezeichnet. Sie wurde immer zwischen zwei Punkten mittels

des Spiegelderivators abgeleitet, z. B. bei $t = 1900$ sek; der Derivator wurde fünfmal eingestellt und abgelesen, die Ablesungen waren 36,9; 37,2; 37,1; 36,9; 36,9°, im Mittel 37,0°; die Tafel liefert $\operatorname{tg} 37{,}0° = 0{,}7535 = \frac{ds}{dt}$. Es fragt sich, welcher Umlaufgeschwindigkeit diese Neigung entspricht; das hängt ganz von den willkürlich gewählten Maßstäben der Kurvenauftragung ab; diese sind für die s-Kurve:

$$300 \text{ Uml.} = 1 \text{ mm und } 60 \text{ sek} = 1 \text{ mm}.$$

Durch Dividieren beider Seiten erhält man:

$$\frac{300 \text{ Uml}}{60 \text{ sek}} = 1;\ 5 \text{ Uml/sek} = 1 \quad \text{oder} \quad 300 \text{ Uml/min} = 1.$$

Da $\operatorname{tg} 45° = 1$ ist, so entspricht also der Kurvenneigung 45° die Umlaufzahl 300/min; allgemein aber kann man die Umlaufzahl finden, indem man die Tangente des Neigungswinkels mit 300 multipliziert. Für $t = 1900$ sek ist also $n = 0{,}7535 \cdot 300 = 226{,}0$ Uml/min. — Dieser Punkt ergibt nun mit anderen ebenso ermittelten die n-Kurve, die die Abnahme der minutlichen Umlaufzahl, der Umlaufgeschwindigkeit, zur Darstellung bringt.

Die Wahl des Maßstabes beim Auftragen der minutlichen Umlaufzahl ist beliebig; man kann also auch die Werte der Differentialquotienten, die man ja in absoluten Zahlen erhält, beliebig auftragen und den Maßstab nachher ermitteln.

Leitet man die n-Kurve noch einmal ab, wieder in der Mitte zwischen je zwei Punkten, so erhält man eine dritte Kurve, die die Verzögerungen oder bei passender Wahl des Maßstabes auch gleich die verzögernden Drehmomente geben. Bei der Ermittlung des Maßstabes müssen wir beachten, daß in der Gleichung $M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ unter ω die Winkelgeschwindigkeit in Einheiten des technischen Maßsystems (S. 72) gemeint ist. Die Maßstäbe der n-Kurve sind:

$$600 \text{ Uml/min} = 6 \cdot 10{,}47 \text{ techn. Einh.} = 50 \text{ mm} \quad \text{und} \quad 60 \text{ sek} = 1 \text{ mm}.$$

Durch Dividieren beider ergibt sich

$$\frac{6 \cdot 10{,}47 \text{ t. Einh.}}{60 \text{ sek}} = 50;\ 0{,}0209 \frac{\text{t. Einh.}}{\text{sek}} = 1.$$

Bei einem Trägheitsmoment von 5,60 m · kg · sek², wie es auf S. 242 für diese Scheibe ermittelt ist, entspricht der Beschleunigung von $\frac{d\omega}{dt} = 0{,}0209$ Geschwindigkeitseinheiten in der Sekunde ein Drehmoment von $5{,}60 \cdot 0{,}0209 = 0{,}117$ m · kg; dieses Drehmoment entspricht also dem Tangens 1 des Neigungswinkels. Ergab beispielsweise bei $t = 2300$ sek der Spiegelderivator die Ablesung 24,48°, entprechend $\operatorname{tg} 24{,}48° = 0{,}4553$, so ist zu dieser Zeit das verzögernde Drehmoment $0{,}4553 \cdot 0{,}117 = 0{,}0532$ m · kg. Dieser Punkt zusammen mit anderen, ebenso zu ermittelnden gibt die M_d-Kurve der Fig. 190.

Wenn nun im allgemeinen die Abhängigkeit des Drehmomentes und vielleicht auch der Leistung von der Umlaufzahl interessiert, so kann man zueinander gehörige Punkte von M_d und n aus Fig. 190 entnehmen und die Beziehung in Fig. 191 auftragen, auch die Leistung finden. So sind für $t = 2000$ zueinander gehörige Werte: $n = 215$ Uml/min, $M_d = 0{,}058\,\text{m} \cdot \text{kg}$, also $N = \frac{0{,}058 \cdot 215}{716} = 0{,}0174$ PS — wie in Fig. 191 als Punkte A und A_1 eingetragen. Punkt B ist durch die auf S. 242 besprocheneBeobachtung der Reibung der Ruhe gegeben. Die starke Zunahme der Verluste an Leistung und an Drehmoment mit höheren Umlaufzahlen ist wohl hauptsächlich durch die Ventilatorwirkung der Scheibe zu erklären. —

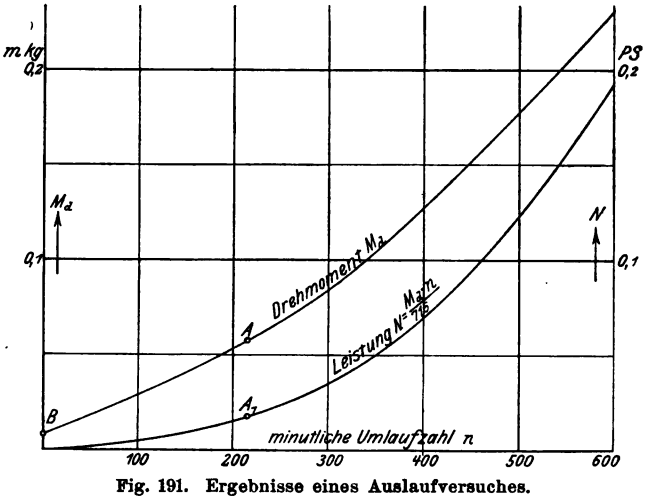


Fig. 191. Ergebnisse eines Auslaufversuches.

An die Stelle des Differenzierens kann übrigens auch das *Bilden von Differenzen* treten. So hat man in dem Versuch Fig. 190 beobachtet

zur Zeit $t =$	48	633	1021	1504	sek
den Zählerstand $s =$	60 000	65 000	67 500	70 000	Uml.
Also ist zur mittleren Zeit $t_m =$		340	827	1262	sek
die Umlaufgeschwindigkeit gewesen $n =$		$\frac{5000 \cdot 60}{585} = 513$;	$\frac{2500 \cdot 60}{388} = 387$;	$\frac{2500 \cdot 60}{483} = 311$	Uml/min
oder $\omega = 0{,}1047 \cdot n =$		53,8	40,5	32,6	techn. Einh.
Weiter war zur mittleren Zeit $t'_m =$			583	1045	sek
die Beschleunigung $\frac{d\omega}{dt} =$		$\frac{13{,}3}{487} = 0{,}0273$;	$\frac{7{,}9}{435} = 0{,}0182$		techn. Einh.
also das Drehmoment $5{,}60 \cdot \frac{d\omega}{dt} =$		0,153	0,102		m kg

Diese Werte stimmen ziemlich mit den in Fig. 190 dargestellten überein.

Für einzelne Werte und wo ein Differenzierapparat nicht verfügbar ist, kann dieses Verfahren empfohlen werden. Doch führt es im

allgemeinen nicht schneller, wohl aber weniger genau zum Ziel, und es versagt, wo unregelmäßige Kurven vorliegen; bei mangelhaften Ablesungen bleibt die vorgängige graphische Ausgleichung unerläßlich, sollen nicht die Differenzen ganz sprunghaft verlaufen.

Die besprochene Methode setzt voraus, daß man vorher das Trägheitsmoment durch einen Schwingungsversuch bestimmt hat. Dazu muß meist der umlaufende Teil ausgebaut werden. Man kann das vermeiden und die Bestimmung des Trägheitsmomentes der umlaufenden Massen mit der der Auslaufwiderstände vereinigen, indem man zwei Auslaufversuche mit verschiedenen Bedingungen macht und aus dem Unterschied der Ergebnisse alles Gewünschte findet. Die Methode ist mannigfach anwendbar und hat für die Praxis den Vorteil, die Dauer des eigentlichen Versuchs aufs äußerste zu beschränken, die Maschine daher nur kurz dem Betriebe zu entziehen, dabei bei geschickter Durchführung und vollständiger Durcharbeitung gleich sehr zahlreiche Ergebnisse zu liefern. Ein Beispiel erörtert am besten diese *Methode des doppelten Auslaufversuches*.

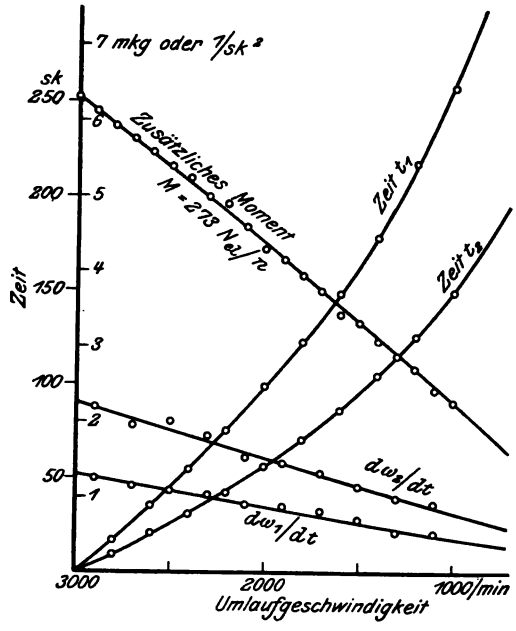


Fig. 192. Zur Methode des doppelten Auslaufversuches.

Zu bestimmen sind die Eigenverluste der umlaufenden Teile eines Turbodynamosatzes. In zwei Auslaufversuchen wird die Turbine auf je reichlich 3000 Uml/min gebracht und dann der Dampf mittels des Schnellschlußventils plötzlich abgestellt. Beim ersten Auslaufversuch war die Turbine unbelastet, beim zweiten arbeitete sie auf einen beliebigen, während des Auslaufens möglichst unveränderlichen äußeren Widerstand. Die in den äußeren Widerstand gehende Energiemenge wird durch Ablesen des Voltmeters und des Amperemeters, besser noch durch Einbau eines Wattmeters bestimmt. Die Ablesungsergebnisse sind in Fig. 192 graphisch gegeben. Es wurden Signale gegeben, wenn das Tachometer durch 3000, 2950 ..... Touren hindurchging, zugleich wurde beim Durchgang durch 3000 die Stechuhr in Gang gesetzt. Als zugehörig zu den Umlaufzahlen wurden daher die Beobachtungszeiten t_1 für den ersten Versuch und t_2 für den zweiten Versuch erhalten, ein zweiter Beobachter las zu den gleichen Zeiten das Wattmeter ab; die elektrische Leistung ist dann in Drehmoment umgerechnet und dies in die Figur eingetragen: $M = 973 \cdot \frac{Nel}{n}$.

Das Auslaufen erfolgt nun im ersten Fall unter der Einwirkung

des unbekannten und zu bestimmenden Momentes M_1 der Eigenwiderstände, nach der Beziehung

$$M_1 = J \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der zweite Auslauf erfolgt unter dem Einfluß von Widerständen $M_2 = M_1 + M$, die sich aus dem gleichen Drehmoment M_1 der Eigenverluste und dem der äußeren Arbeit entsprechenden, in Fig. 192 dargestellten M zusammensetzen; es gilt die Beziehung

$$M_2 = J \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Das Trägheitsmoment der auslaufenden Masse ist konstant; die Eigenwiderstände müssen in beiden Fällen tunlichst gleich gehalten werden. Dazu wird man beispielsweise schon beim ersten Versuch die Erregung angestellt haben und sie bei beiden Versuchen gleichhalten.

Durch einfaches Subtrahieren der Beziehungen (2) und (1) voneinander ergibt sich nun

$$M_2 - M_1 = M = J\left(\frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt}\right) \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

Deshalb sind in Fig. 192 durch Ableiten der Kurven für t_1 und für t_2 die Kurven der $\frac{d\omega_1}{dt}$ und $\frac{d\omega_2}{dt}$ gebildet. Durch Herausgreifen der zu einer beliebigen Tourenzahl gehörigen Werte ergibt sich mit

$$J = \frac{M_2 - M_1}{\frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

jedesmal das Trägheitsmoment der auslaufenden Masse.

In Fig. 192 ist z. B.

$$\text{für } n = 3000: \frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt} = 0{,}95;\ M_2 - M_1 = 6{,}32;\ J = 6{,}66$$

$$\text{für } n = 2500: \frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt} = 0{,}81;\ M_2 - M_1 = 5{,}35;\ J = 6{,}61$$

$$\text{für } n = 2000: \frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt} = 0{,}65;\ M_2 - M_1 = 4{,}38;\ J = 6{,}74$$

$$\text{Mittelwert } J = 6{,}67$$

Die Übereinstimmung ist wegen der graphischen Ausgleichung befriedigend, obwohl die differenzierten Punkte recht wechselnd fielen. Mit dem Mittelwert findet sich der Eigenverlust

$$\text{für } n = 3000: \frac{d\omega_1}{dt} = 1{,}31;\ M_1 = 6{,}67 \cdot 1{,}31 = 8{,}74 \text{ mkg}.$$

Aus diesem Eigenverlust an Drehmoment findet sich der Leistungsverlust bei 3000 Uml/min

$$N = \frac{8{,}74 \cdot 3000}{973} = 26{,}9 \text{ KW}.$$

Nachdem man übrigens das Trägheitsmoment einmal kennt, kann man in gleicher Weise die verschiedensten anderen Bestimmungen machen, z. B. über den Einfluß verschiedenen Druckes im Turbinengehäuse oder verschiedener Erregung auf die Eigenverluste.

Im ganzen ist die Ermittlung von Kräften aus den Beschleunigungs- oder Verzögerungsverhältnissen nicht eben einfach. Der Vorteil ist aber, daß man gleich den ganzen Verlauf der Abhängigkeit der Größen voneinander erhält, den man sonst nur aus einer großen Zahl von Einzelversuchen bekommt.

X. Der Indikator.

82. Kolbenwegdiagramme. Indizierte und effektive Leistung. Der Indikator ist eines der wichtigsten Instrumente für die verschiedensten Untersuchungen. Weil er für recht mannigfache Zwecke verwendbar ist, soll er in einem besonderen Kapitel besprochen werden.

In seiner häufigsten Verwendungsart ist der Indikator ein registrierender Spannungsmesser, der die im Zylinder einer Kolbenmaschine auftretenden Spannungen graphisch aufzeichnet; fast immer geschieht die Aufzeichnung dieser Spannungen als Funktion des vom Kolben der betreffenden Maschine zurückgelegten Weges, weil das in dieser Weise aufgezeichnete Schaubild oder *Indikatordiagramm* ohne weiteres die Ermittlung der Maschinenleistung gestattet. Das Diagramm ist nämlich, entsprechend der Tatsache, daß der Maschinenkolben hin und her geht und das gleiche Spiel der Spannungen sich immer wiederholt, eine in sich geschlossene Figur; es hat oft die in Fig. 193 für ein Dampfdiagramm als Beispiel angegebene Form. Auf dem Hinweg des Kolbens, von links nach rechts, stellt die Linie $a\,b\,c$ den Verlauf der Spannung und daher der auf den Maschinenkolben wirkenden Kolbenkraft dar, auf dem Rückgange gibt Linie $d\,e\,f$ ihn wieder. Dann bedeutet die Fläche des Diagramms, das ist der Inhalt der Figur $a\,b\,c\,d\,e\,f$, die vom Dampf an den Kolben abgegebene Arbeit. Während nämlich der Kolben sich beim Hingange von x nach x_1 bewegte, lastete eine von xz auf $x_1 z_1$ abnehmende Kraft auf ihm, der Dampf gab also eine Arbeit $\frac{1}{2}(x\,z + x_1\,z_1) \times x x_1 = x z z_1 x_1$ an ihn ab. Während der Kolben beim Rückgange von x_1 nach x ging, lastete die Kraft $x_1 y_1 = xy$ auf ihm; diesmal aber wirkte die Kraft der Bewegung entgegen, der Kolben mußte also Arbeit leisten, nämlich den Dampf in das Auspuffrohr hinausdrängen. Der Kolben gab jetzt die Arbeit $x_1 y_1 y x$ wieder her. So stellt Fläche $z z_1 y_1 y$ diejenige

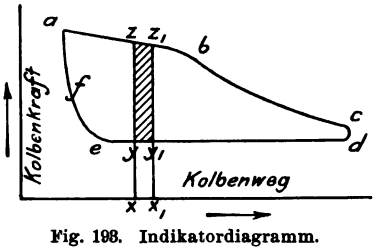


Fig. 198. Indikatordiagramm.

Arbeit dar, die dem Kolben verblieben ist, die also das arbeitende Medium an den Kolben während des Wegstückes $x x_1$ abgegeben — bei einer Arbeitsmaschine von ihm aufgenommen — hat. Denkt man das ganze Diagramm in schmale Streifen zerlegt, so sieht man, daß auch sein ganzer Flächeninhalt die ganze vom Dampf an den Kolben abgegebene Arbeit darstellt.

Der Indikator stellt bei der Dampfmaschine die vom Dampf auf den Kolben übertragene Leistung fest; eine auf das Schwungrad gesetzte Bremse würde die an der Welle verfügbare Leistung messen. Letztere ist um so viel geringer, wie die Reibung und andere Verlustquellen ausmachen. Man nennt nun die durch Indikator ermittelte die *indizierte Leistung* N_i, die an der Welle verfügbare heißt die *effektive* oder auch die *Bremsleistung* N_e oder N_b der Dampfmaschine.

Der Indikator stellt bei einer Kolbenpumpe die vom Kolben auf das Wasser übertragene Leistung fest; der treibenden Welle muß man eine um die Reibungsverluste größere Leistung zuführen, die man mittels Transmissionsdynamometer messen kann. Die erstere heißt wieder die *indizierte Leistung* der Pumpe, für die der Welle zuzuführende Leistung hat man keinen festen Ausdruck: man nennt sie wohl Riemen- oder Wellen- oder *Antriebleistung*. Unter *effektiver Leistung* der Pumpe aber versteht man die in Form von gehobenem Wasser verfügbare Leistung, das ist das Produkt aus sekundlicher Wassermenge und Förderhöhe (geteilt durch 75, will man auf PS kommen).

Bei Kreiselradmaschinen, wie Turbinen und Zentrifugalpumpen, gibt es eine indizierte Leistung wohl begrifflich, doch läßt sie sich nicht messen. Bei Werkzeugmaschinen kann man nicht von einer effektiven sprechen. Im übrigen aber wird man die an Beispielen erklärten Begriffe leicht auf andere Fälle übertragen können.

83. Bauarten des Indikators. Fig. 194 bis 208 stellen einige viel verwendete Formen von Indikatoren dar. Der Indikator besteht aus einem kleinen, an die zu untersuchende Maschine anzuschließenden Zylinder. In ihm spielt dicht eingeschliffen ein Kolben und betätigt durch Vermittlung eines Hebelwerkes einen Schreibstift; der Schreibstift zeichnet auf einer um ihre Achse drehbaren Trommel das Diagramm auf. Die Spannung des im Maschinenzylinder arbeitenden Mediums gelangt durch eine Bohrung in den Indikatorzylinder und übt auf den Indikatorkolben Kräfte aus, die durch eine doppelgängige Schraubenfeder gemessen werden, indem diese Feder einerseits mit dem Kolben oder der Kolbenstange, andererseits mit dem Deckel des Indikatorzylinders verschraubt ist.

Die den Druck messende Feder liegt bei Fig. 194 und 201 im Innern des Indikatorzylinders und wird daher warm, wenn das arbeitende Medium warm ist; in Fig. 198, 202 und 206 ist die Feder so angebracht, daß sie unter allen Umständen kalt bleibt; daher die Einteilung der Indikatoren in *Warm-* und *Kaltfederinstrumente*. Die Feder drückt sich, passende Ausführung vorausgesetzt, proportional den unter den Kolben kommenden Spannungen zusammen; die Kolbenausschläge werden also den Spannungen proportional. Sie werden durch das Hebelwerk des *Schreib-*

zeuges proportional vergrößert, und da dieses Hebelwerk auch so angeordnet ist, daß der Schreibstift geradlinig und parallel zur Achse des Indikatorzylinders geführt wird, so trägt der Schreibstift auf der Trommel im senkrechten Sinne, als Ordinaten, die Spannungen im Indikator-

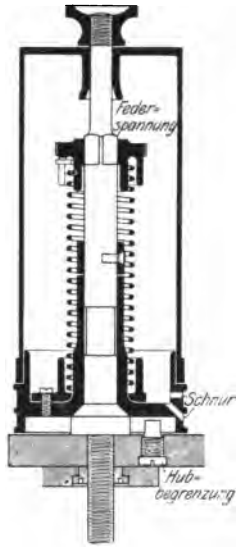


Fig. 197. Schnitt durch die Trommel.

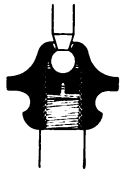


Fig. 196. Kugelgelenk *K*.

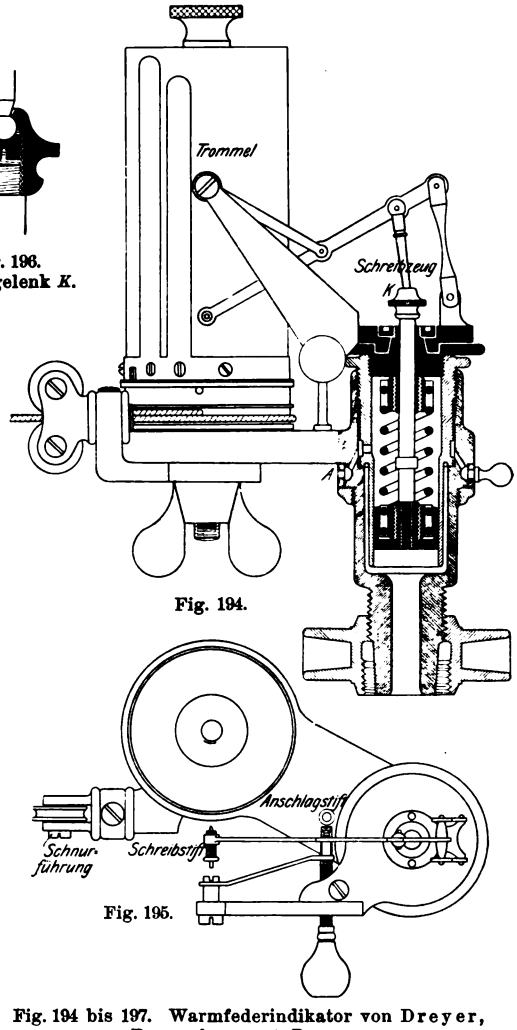


Fig. 194.

Fig. 195.

Fig. 194 bis 197. Warmfederindikator von Dreyer, Rosenkranz & Droop.

zylinder oder die im Maschinenzylinder auf — genau freilich nur, wenn alle Bewegungen reibungsfrei und so langsam vor sich gehen, daß man von Massenwirkungen absehen kann. — Stände die Trommel still, so würde der Schreibstift auf einer ihrer Mantellinien auf und ab spielen und dabei senkrechte Gerade auf einem Papier schreiben, das man auf die Trommel spannt und das durch die beiden Klemmfedern auf der Trommelfläche festgehalten wird. Nun bewegt sich aber die Trommel, und zwar führt sie eine schwingende Drehbewegung aus. In eine um das untere Ende der Trommel gehende Rille ist eine Schnur gelegt, die durch ein Loch ins Trommelinnere geht und durch einen davorgesetzten Knoten am

Herausziehen gehindert wird. Das andere freie Ende der Schnur verbindet man mit irgendeinem Maschinenteil, der eine mit der Kolbenbewegung gleichartige Bewegung ausführt, meist mit dem Kreuzkopf der Maschine. Um die Schnur jederzeit gespannt zu halten, ist im Innern der Trommel eine Schraubenfeder vorhanden, die im Ruhezustande einen an der Trommel befindlichen Ansatz gegen eine Anschlagschraube laufen läßt. Diese Hubbegrenzung gestattet eine Bewegung von etwas weniger als 360°. Wenn nun die Schnur, entgegen der Federspannung, die Trommel bewegt, so sind die von der Trommel ausgeführten Winkeldrehungen proportional dem Kolbenhub, und daher

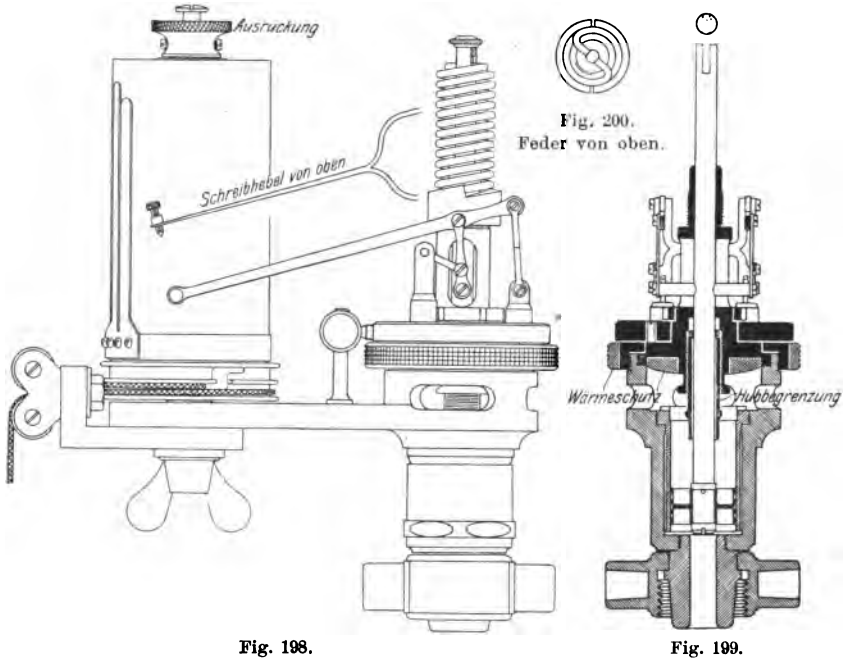


Fig. 200.
Feder von oben.

Fig. 198. Fig. 199.

Fig. 198 bis 200. Kaltfederindikator von Maihak.

wird der Schreibstift als Abszissen Kolbenwege auftragen. Durch das Zusammenwirken der beiden Bewegungen des Schreibstiftes und der Trommel kommt das Diagramm zustande. Die umfahrene Fläche ist, wie schon bewiesen wurde, ein Maß für die bei einem Maschinenumlauf von der betreffenden Kolbenseite geleistete Arbeit; sie kann mit dem Planimeter (§ 21) ermittelt werden.

Oft ist nun freilich der Hub der Maschine größer als der freie Umfang der Indikatortrommel; die Diagrammlänge aber ist durch die zwischen den Aufspannfedern freie Papierlänge begrenzt. Dann hat man die Kolbenwege nicht in natürlicher Größe, sondern proportional verkürzt aufzutragen. Diese Verkürzung wird durch einen *Hubminderer* bewirkt, der unmittelbar an den Indikator angebaut sein kann. Fig. 201

zeigt im Bilde den Rosenkranzschen Warmfederindikator mit darangebautem Hubminderer. Der Hubminderer hat zwei Schnurscheiben verschiedenen Durchmessers, die auf einer gemeinsamen Achse sitzen. Die vom Kreuzkopf kommende Schnur wird auf die große Scheibe geführt, das Ende durch ein Loch hindurchgefädelt und durch einen Knoten am Herausfallen gehindert; eine ebenso an der kleinen Rolle befestigte Schnur führt zur Indikatortrommel und treibt diese. Die Bewegung der Trommel wird dadurch im Verhältnis der beiden Scheibendurchmesser vermindert. Im Innern der größeren Scheibe pflegt eine Spiralblattfeder zu sein, die zum Zurückführen dient; doch kann sie auch entbehrt werden, wenn die Trommelfeder zum Zurückführen auch der Minderungsrollen ausreicht. An dem Hubminderer ist übrigens noch, ebenso wie am Indikator selbst, eine Schnurführung, die es gestattet, die Schnur nach irgendeiner Richtung des Raumes weglaufen zu lassen. Ein Ring (oder ein Stückchen Rundgummi) ist so in die Kreuzkopfschnur eingeknüpft, daß die Schnüre zum Hubminderer und zur Trommel niemals lose werden, sondern etwas Vorspannung behalten; sie verwirren sich sonst.

Rollenhubminderer werden auch, statt zum Unterschrauben unter die Indikatortrommel, zum getrennten Anbau unter Befestigung an irgendeinem vorstehenden Maschinenteil, Muttern oder ähnlichem, hergestellt (Stanek-Reduktor). Der Anbau ist dann stabiler; der in Fig. 201 weitausladende Hubminderer biegt sich leicht durch, wenn die Schnur nicht geradeaus zieht; doch ist der mit dem Indikator verbundene Hubminderer handlicher; man stütze ihn im Notfall ab. Außerdem verwendet man auch wohl *Hebelhubminderer*, die an häufig zu indizierenden Maschinen fest an die Maschine gebaut sind und die Verkürzung des Hubes durch einen ungleicharmigen Hebel erreichen; der längere Hebelarm wird vom Kreuzkopf aus getrieben. Es ist darauf zu achten, ob solche Hubminderer auch proportionale Verkürzung des Hubes ergeben.

Der Anbau des Indikators an den Zylinder geschieht unter Zwischenschaltung eines *Indikatorhahnes* (Fig. 201 und 202), den man in einen an jedem Maschinenzylinder vorgesehenen Indikatorstutzen einschraubt und bei häufiger Benutzung am besten an der Maschine läßt, während an ihn nach Bedarf der Indikator angeschraubt wird — bei Fig. 199 und 207 mittels einfacher Überwurfmutter, bei Fig. 194 und 203 mittels einer Differentialverschraubung; zur Abdichtung dient eine konische Fläche. Der Hahn ist eine Art Dreiweghahn; außer der durchgehenden Bohrung von etwa 10 mm Durchmesser ist eine Seitenbohrung von 1 mm Weite im Küken vorhanden, der eine ebenso weite Seitenbohrung (*O* in Fig. 202) am Hahngehäuse entspricht. Das Küken kann nur um 90° so gedreht werden, daß entweder die durchgehende weite Bohrung den Indikator mit dem zu indizierenden Zylinder verbindet, die kleine Bohrung aber geschlossen ist, oder daß das Indikatorinnere vom Zylinder getrennt und durch die feine Bohrung mit der Atmosphäre verbunden ist. In letzterem Fall steht der Indikatorschreibstift in seiner Ruhelage und man kann auf dem Diagrammpapier eine wagerechte Gerade, die *Atmosphärenlinie*,

als Ausgang für Druckmessungen ziehen; man tut das auf jedem Diagramm, obwohl aus der Ableitung des vorigen Paragraphen hervorgeht, daß zur Arbeitsermittlung die Lage des Diagramms zur Atmosphärenlinie belanglos ist, da es nur auf die Fläche ankommt. Belanglos ist es auch, ob bei auftretendem Vakuum die Diagrammfläche ganz oder teilweise unter der Atmosphärenlinie liegt.

Damit über dem Indikatorkolben sicher Atmosphärendruck herrscht, auch wenn der Kolben etwas undicht laufen sollte, muß der Raum

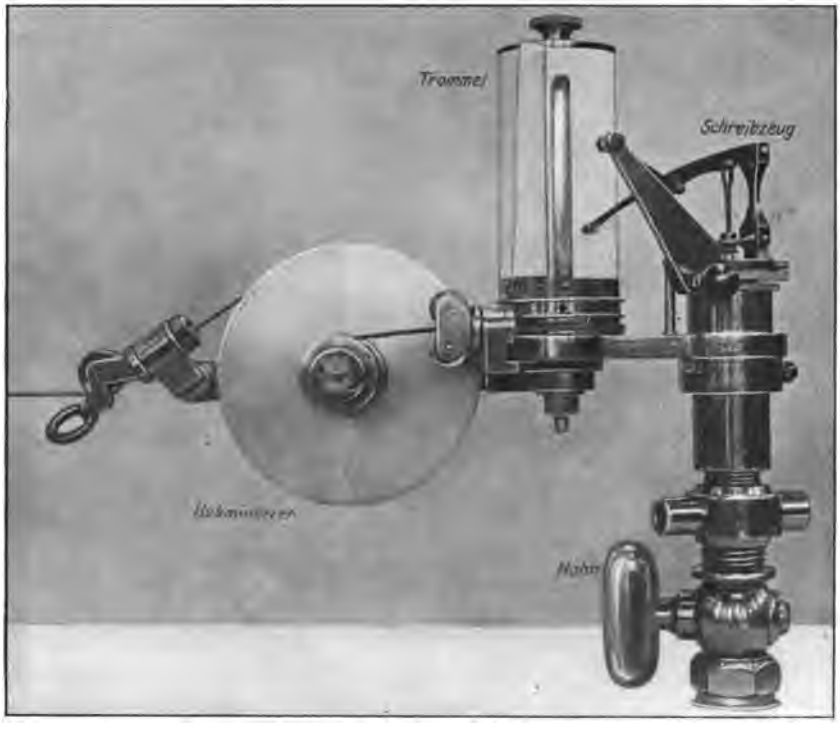


Fig. 201. Indikator und Hubminderer von Dreyer, Rosenkranz & Droop.

über dem Kolben mit der Atmosphäre durch Löcher genügender Größe verbunden sein; bei den Rosenkranz-Indikatoren dienen Löcher in einem drehbaren Ring dazu, den etwa ausblasenden Dampf nach einer Richtung zu lenken, wo er nicht stört (*A*, Fig. 194 und 202, auch in Fig. 201 zu sehen). Dieser Ausweg zur Atmosphäre erweist sich oft als zu klein, und die Durchbrechung (Fig. 198 und *A*, Fig. 206) ist zweifellos vorzuziehen.

Am Indikator kann man die Meßfeder, am Hubminderer die kleinere Rolle *auswechseln* und es in jedem Fall dahin bringen, daß das Diagramm das ganze Papier nach Länge und Breite ausnutzt — außer wenn man bei

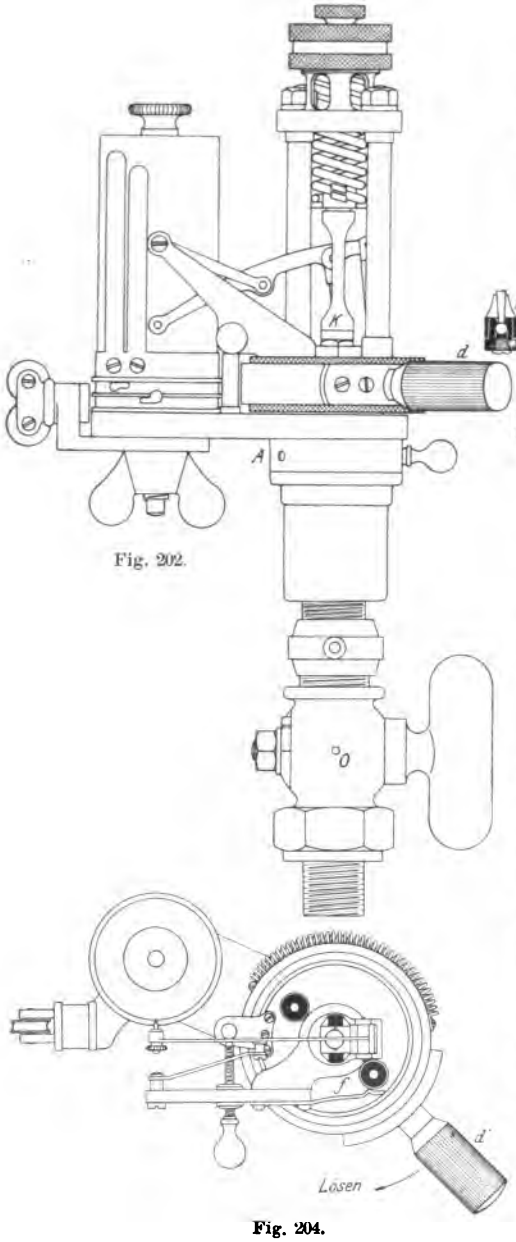


Fig. 202.

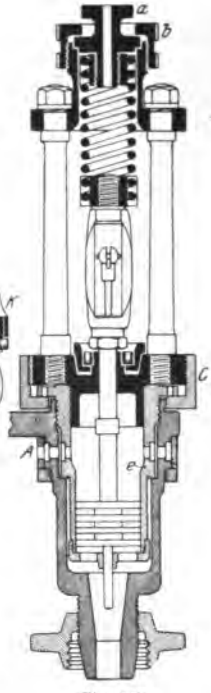


Fig. 203.

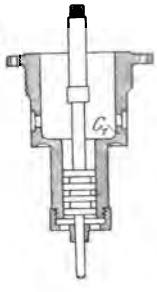


Fig. 205. Auswechselbarer Einsatz.

Fig. 204.

Fig. 202 bis 205. Kaltfederindikator von Dreyer, Rosenkranz & Droop[1]).

höheren Umlaufzahlen der Massenwirkungen wegen mit kleineren Diagrammen vorlieb nehmen muß (S. 291). Um die anzuwendenden Teile erkennen zu können, trägt jede der kleineren Rollen den Maschinenhub aufgestempelt, bis zu dem sie ausreicht; jede der Federn trägt eine Angabe des Höchstdruckes, bis zu dem sie ausreicht, etwa 5 kg — das heißt ausreichend bis zu 5 at — und außerdem trägt sie den sogenannten *Federmaßstab* aufgestempelt; die Angabe 12 mm bedeutet dann, daß für 1 at Druckänderung der Schreib-

[1]) Die Feder *f*, Fig. 204, zum An- und Abstellen des Schreibzeuges, ist in Fig. 202 versehentlich nicht eingezeichnet.

stift einen Weg von 12 mm zurücklegt: 12 mm = 1 at. Die Feder selbst drückt sich dann um 2 mm für jede Atmosphäre zusammen, die sechsfache Übersetzung des Getriebes vergrößert den Hub. Die ganze Diagrammhöhe könnte bei dieser Feder $5 \times 12 = 60$ mm betragen von der Ruhelage des Schreibstiftes bei Atmosphärenspannung aufwärts, dazu die 12 mm für etwa eintretendes Vakuum — das ergibt eine gesamte Diagrammhöhe von 72 mm; so hoch ist etwa die Indikatortrommel.

Die in den Schnittfiguren schwarz gezeichneten Teile bilden das sogenannte *Schreibzeug* und lassen sich vom Indikatorzylinder im ganzen abnehmen (Fig. 209). Fig. 210 zeigt das Schreibzeug eines Kaltfeder-

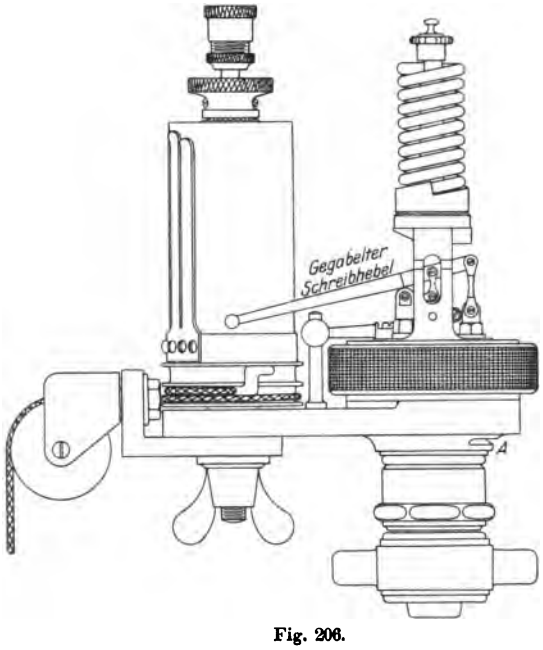


Fig. 206.

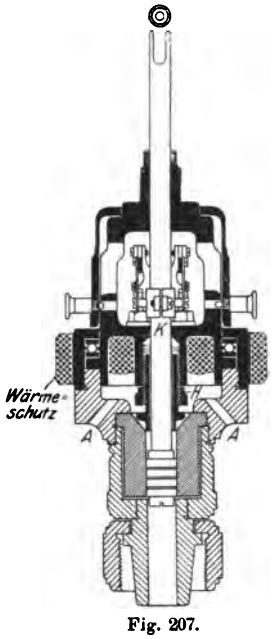


Fig. 207.

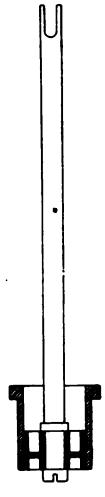


Fig. 208. Einsatz.

Fig. 206 bis 208. Kaltfederindikator von Lehmann & Michels.

indikators gleicher Herkunft; der Deckel ist meist durch Aufschrauben am Indikator zu befestigen; bei Fig. 202 dient dazu eine Art Geschützverschluß — im Indikatorkörper und am Deckel ist das Gewinde segmentweise vorhanden, in den Zwischenräumen der Gewindefaden entfernt, so daß eine Drehung des Deckels um nur 60° mittels des Griffes *d* die Lösung bewirkt.

Ist der Deckel auf dem Indikator befestigt, so ist gleichwohl ein Teil des Schreibzeuges in gewissen Grenzen drehbar; man muß nämlich den Schreibstift von der Trommel abheben können, um das Papier aufzuziehen, und damit er nicht dauernd schreibt. Deshalb ist das Hebelwerk nicht unmittelbar am Deckel, sondern an einem auf dem Deckel drehbaren Ring befestigt; beim Rosenkranz-Indikator

ist außerdem zwischen Hebelwerk und Kolbenstange, beim Maihak-Indikator zwischen Kolbenstange und Feder eine Kugelbewegung angebracht, um diese Bewegung zu ermöglichen (Fig. 196, 200 und 203 *K*). Bei dem Indikator Fig. 206, der sonst Fig. 198 ähnlich ist, läßt sich der Schreibhebel ganz herumdrehen. Das ist bequem, weil es beim Papieraufspannen sehr lästig ist, wenn man den Schreibstift nicht genügend weit von der Trommel abheben kann; andererseits ist es auch angenehm, den Schreibstift zum Schreiben von rechts oder von links her zu benutzen, je nachdem, wie es nach den örtlichen Verhältnissen gerade bequemer ist. Um die Drehung des Deckels auch dann leicht bewirken zu können, wenn der Kolben unter Druck steht, ist zwischen dem drehbaren Teil und der großen Überwurfmutter, die ihn festhält, ein Kugellaufring angebracht. — Die Meßfeder ist beim Rosenkranz-Indikator beiderseits mit Gewinde befestigt, einerseits am Deckel, andererseits am Kolken; bei Fig. 199 und 207 ist die Feder am Deckel ebenfalls mit Gewinde befestigt, andererseits aber ist sie an das Ende der Kolbenstange mit der schon erwähnten Kugelbewegung angeschlossen, indem eine an die Feder angeschmiedete Kugel in einem Schlitz der Kolbenstange durch eine Überwurfmutter gehalten wird. Letztere Bauart erspart den Gewindekopf an dem beweglichen Federende und vermindert daher die bewegte Masse — wie wir wissen (§ 7 und 8), ein Vorzug jedes Meßinstrumentes; doch wird die Bauart auf Wunsch auch von Rosenkranz verwendet. Zum Auswechseln der Meßfeder muß man beim Warmfederindikator den Deckel losschrauben und dann zunächst das Kugelgelenk *K*, Fig. 194, von der Kolbenstange lösen; bei den Kaltfederindikatoren kann man die Feder ohne Abnehmen des Deckels auswechseln.

Der Kolben läuft nicht in dem Indikatorzylinder selbst, sondern in einem *auswechselbaren Einsatz*; das hat, besonders bei Dampf, den Vorteil, daß der Einsatz auch außen von dem arbeitenden Medium umspült ist und daher kein Klemmen des Kolbens dadurch eintritt, daß er warm, die Lauffläche aber kälter ist. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist es, daß man Einsatz und Kolben erneuern kann, wenn sie abgenutzt und daher undicht, oder wenn sie durch einen Stoß beschädigt sind. Außerdem kann man den Einsatz gegen einen enger gebohrten auswechseln und dann einen *kleineren Kolben* verwenden; dadurch reicht der Indikator bei Benutzung der gleichen Federn für höhere Drucke aus. Der normale Kolbendurchmesser ist beim Rosenkranz-Indikator 20 mm, beim Maihak-Indikator, dessen Konstruktion aus dem amerikanischen Crosby-Indikator hervorgegangen ist, $^3/_4''$ englisch = 19,05 mm; es werden nun Kolben und Einsätze geliefert, für die die Kolbenfläche ein gewisser Bruchteil der normalen Kolbenfläche ist, bei Rosenkranz insbesondere $^1/_4$, $^1/_{25}$, bei Maihak $^1/_2$, $^1/_5$, $^1/_{10}$ . . .; wenn wir am Rosenkranz-Indikator einen Kolben von 10 mm Durchmesser, entsprechend $^1/_4$ der normalen Fläche, mit der Feder verwenden, deren Federmaßstab eigentlich 12 mm = 1 at ist, so wird bei dieser Zusammenstellung der Federmaßstab mit 12 mm = 4 at, also 3 mm = 1 at einzuführen sein; dafür reicht die Feder nun nicht nur bis 5 at Spannung,

sondern bis $5 \times 4 = 20$ at — eine Spannung, für die Federn sonst schwer befriedigend herstellbar sind. Bei Verwendung der kleinen Kolben treten, zumal bei schnellem Gang, leicht unangenehme Massenwirkungen auf, auf die wir noch zu sprechen kommen (S. 297); das Verhältnis zwischen wirksamer Kraft und Trägheit, auf das es nach den Darlegungen des § 7 ankommt, wird ungünstiger. Der Einsatz ist bei Fig. 194, 199 und 203 von oben her eingeschraubt, bei Fig. 207 ist er zwischen den Unterteil und den Trommelsteg des Indikators eingeklemmt. Erstere Bauweise hat den Vorteil, daß man nur das Schreibzeug abzunehmen hat, um den Einsatz auswechseln zu können, der Schnurantrieb zur Trommel bleibt unversehrt; der Vorteil ist erheblich, wenn man bei Gasmaschinen mehrfach abwechselnd Schwach- und Starkfederdiagramme nehmen will. Die Bauweise Fig. 207 gestattet es, den gleichen Indikator an Ammoniak-Kompressoren zu verwenden, indem man nur den Einsatz und das Indikatorunterteil gegen solche aus Eisen auswechselt. — Einen Indikator, der umgekehrt die Verwendung *größerer als der normalen Kolben*, nämlich solcher von vierfacher Fläche gestattet, werden wir in Fig. 230 und 231 kennen lernen; dort ist kein auswechselbarer Einsatz vorhanden, sondern es sind Bohrungen von 40, 20 und

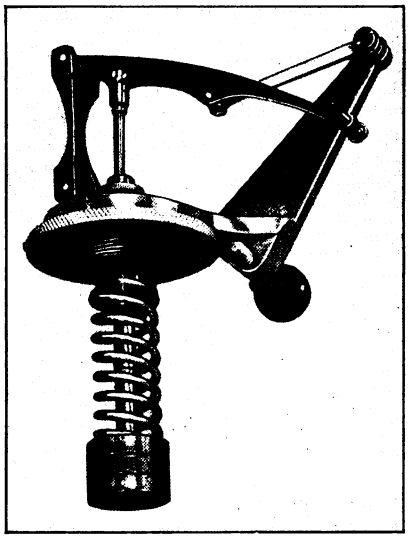


Fig. 209.
Schreibzeug von Fig. 194, herausgenommen.

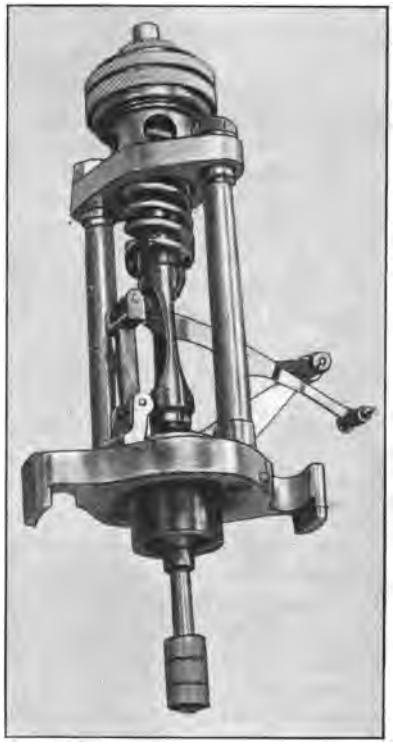


Fig. 210. Schreibzeug eines Kaltfederindikators von Dreyer, Rosenkranz & Droop, mit 10 mm-Kolben.

auch 10 mm vorhanden; der 40 mm-Kolben wird für kleine Drucke verwendet, wie sie namentlich an Gebläsen zu indizieren sind.

Die Verbindung des Schreibzeuggetriebes mit dem Kolben ist meist unveränderlich. Bei Fig. 207 kann mit Hilfe des Klemmfutters *K* die einer bestimmten Kolbenstellung zugeordnete Schreibstiftstellung verändert werden; das ist z. B. nicht unwichtig, wenn man mit der gleichen Feder einmal vom Vakuum bis zu 3 at Überdruck, ein anderes Mal von Atmosphärenspannung bis zu 4 at Überdruck arbeiten will und der Federmaßstab gerade für 4 Atmosphären im ganzen ausreicht.

Um die Feder vor Überlastung zu schützen, muß der Kolben rechtzeitig gegen eine Hubbegrenzung laufen. Dazu hat in Fig. 194, 203, 210 die Kolbenstange einen Bund. In Fig. 199 und 207 ist eine besondere verstellbare Muffe (*H*) vorgesehen, um den Hub an beliebiger Stelle begrenzen zu können; diese Einrichtung ist zum Aufnehmen

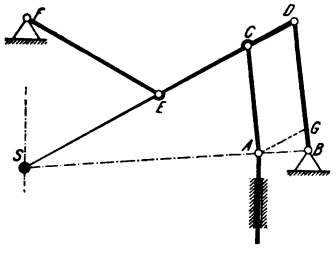


Fig. 211. Thompson-Geradführung.

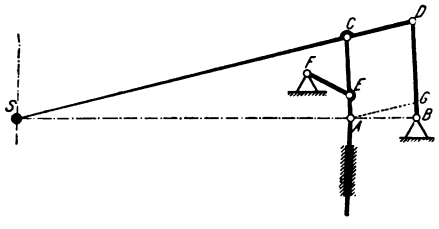


Fig. 212. Crosby-Geradführung.

von Schwachfederdiagrammen an Gasmaschinen (S. 268) unentbehrlich, kann aber bei Fig. 194 durch Zwischenlegen von Distanzringen auf den Bund ersetzt werden.

Das *Schreibgestänge* hat, wie erwähnt, die Aufgabe, die Kolbenbewegung proportional, meist auf das Sechsfache, zu vergrößern und außerdem den Schreibstift auf einer Geraden parallel zur Zylinder- und Trommelachse zu führen. Das Getriebe des Rosenkranz-Indikators ist in Fig. 211, das des Maihak- und Lehmann-Indikators in Fig. 212 dargestellt; doch führen auch hier beide Firmen das jeweils andere Getriebe auf Wunsch aus. Das von Rosenkranz verwendete Thompson-Getriebe beruht auf folgender aus der Kinematik bekannten Tatsache: Wird der eine Endpunkt *S* eines Stabes auf der senkrechten Geraden, der andere Endpunkt *D* auf einer wagerechten Geraden geführt, so macht der Halbierungspunkt *E* der Strecke *SD* Kreisbögen um *F*, den Schnittpunkt der führenden Wagerechten und Senkrechten. Wenn man also umgekehrt den Halbierungspunkt *E* mittels des Gegenlenkers *EF* auf einem Kreise um *F* herumführt, und den Endpunkt *D* auf einer angenäherten Wagerechten führt — angenähert durch einen vom Punkte *D* des Evansschen Lenkers *DB* beschriebenen Kreisbogen —, dann macht der Schreibstift *S* eine Senkrechte, die erst dann wesentlich von der Geraden abweicht, wenn bei großen Ausschlägen die Bewegung von *D* weit von

der Wagerechten abweicht; durch Verlängern des Evansschen Lenkers kann man jede beliebige Annäherung an die genaue *Geradführung* erreichen. — Das von Maihak verwendete Crosby-Getriebe enthält den gleichen Evansschen Lenker, sowie den gleichen Schreibhebel *SD*; der Gegenlenker *FE* ist anders angebracht. Man kann offenbar die Bewegung eines beliebigen Punktes der Kuppelstange *CA*, deren Punkt *A* durch Kolben und Kolbenstange sicher senkrecht geführt ist, zeichnerisch oder rechnerisch für den Fall ermitteln, daß der Schreibstift genau senkrecht geht; die von *E* beschriebene Kurve kann man nun durch einen Kreis annähern, dessen Mittelpunkt *F* zu finden ist; damit ist Mittelpunkt und Länge des Gegenlenkers gegeben; innerhalb gewisser Grenzen wird auch hier die Annäherung befriedigen.

Außer der Forderung der Geradführung ist noch die der *Proportionalität* vom Schreibzeug zu erfüllen; Bedingung hierfür ist, daß die Punkte *S*, *A* und *B* auf einer Geraden liegen, und daß $SA : AB = SC : CD$ sich verhalte. Ist das für eine Stellung des Getriebes erfüllt, so wird es auch für jede andere zutreffen, solange *S* geradegeführt ist, also solange *A* und *S* einander parallel gehen. Man kann dann immer das Storchschnabelgetriebe einzeichnen, das durch Einziehen des Gliedes *AG* statt der Gegenlenker entstehen und ein vorzügliches Getriebe für den Indikator abgeben würde, wenn nicht die Punkte *G* und *B* zu dicht aufeinanderrücken würden, so daß kleine Ungenauigkeiten der Arbeit große Fehler in der Schreibstiftbewegung zur Folge hätten. Auch gegen das Crosby-Getriebe kann man gegenüber dem Thompsonschen den Einwand erheben, *A* und *E* kämen zu dicht zusammen; andererseits ist freilich das Gelenk *E* des Thompson-Getriebes ein konstruktiv schwieriger Punkt, auch ist die Massenwirkung des Thompson-Getriebes größer.

Die *Trommel* des Indikators soll, um die Massenwirkungen gering zu halten und dadurch den Indikator für höhere Umlaufzahlen geeignet zu machen, möglichst leicht sein; sie ist daher aus dünnem Stahlblech, auch wohl aus Aluminium gemacht. Die große Rolle des Hubminderers, für die der gleiche Gesichtspunkt gilt, ist auch aus Aluminium. Die zum Zurückführen der Trommel dienende Schraubenfeder ist unten in den Trommelfuß eingehakt, oben in einen Kopf, der auf der Trommelachse mittels Vierkants gegen Drehung gesichert ist, aber nur etwas gehoben zu werden braucht, um die Feder spannen oder entspannen zu können (Fig. 197 und 214, *D*). — Um das Diagrammpapier gegen neues auswechseln zu können, muß die Trommel angehalten, das heißt die Schnurverbindung mit dem Kreuzkopf gelöst werden. Man kann die Schnur am Kreuzkopf losnehmen und nachher wieder auflegen; letzteres aber macht bei höheren Umlaufzahlen einige Schwierigkeiten; man verwendet wohl einen Fanghaken. Der Mitnehmer des Kreuzkopfes ist einmal (unten) im Augenblick des Einschnappens, einmal fertig eingehängt gezeichnet. Man hat aber auch Indikatortrommeln mit *Anhaltevorrichtung*; bei diesen wird der obere Teil der Trommel, der das Papier trägt, mit dem unteren, den Schnurrillen, nur bei Bedarf gekuppelt, zum Anhalten aber gelöst; die Schnüre laufen dann

weiter, die eigentliche Trommel aber steht still. In Fig. 214 kann man die auf der Trommel sitzende Schraube *T* nach links drehen, dann hebt sie die Trommel hoch und löst die Konuskupplung zur Schnurrille; Rechtsdrehen drückt sie wieder herab und stellt die Kupplung wieder her; der Stift *C*, dessen oberer Teil nach unten federt, sichert noch die richtige Stellung der beiden Teile der Trommel gegeneinander, damit nicht der Schreibstift über die Papierklemmen läuft. Der Druck der Konuskupplung wird durch Kugeln aufgenommen.

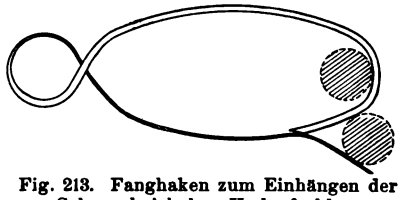


Fig. 213. Fanghaken zum Einhängen der Schnur bei hohen Umlaufzahlen.

Anhaltevorrichtungen geben leicht zu Anständen Anlaß; bei einiger Übung kommt man mit der einfachen Trommel bis zu ziemlich hohen Tourenzahlen besser aus. Eine für sehr hohe Umlaufzahlen geeignete, wenn auch theoretisch nicht korrekte Mitnehmereinrichtung zeigt auch noch Fig. 253 auf S. 306 bei *M*.

Das *Diagrammpapier* ist präpariert, so daß weiche Metalle, wie Silber und Messing, auf ihm schreiben; der *Schreibstift* ist bei Rosenkranz ein Silberstift in einem kleinen Klemmfutter, bei Maihak ein Messingstift mit Gewinde; solche Metallstifte nutzen sich weniger schnell ab, als Bleistifte es täten, die man gelegentlich auch verwendet. Die *Schnur* zum Antrieb der Trommel ist geflochten, nicht gedreht, damit sie sich möglichst wenig unter der beim Hin- und Hergehen wechselnden Spannung der Trommelfeder dehnt; sie ist gewachst, um die Längenänderungen durch Feuchtigkeitseinflüsse zu vermindern.

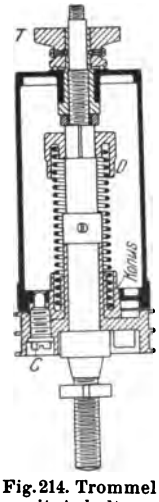


Fig. 214. Trommel mit Anhalteeinrichtung. Zu Fig. 198 oder 206.

Die Indikatoren der verschiedenen Bauarten werden in *mehreren Größen* gefertigt; die normale Kolbenfläche ist freilich bei allen 20 mm, bzw. $^3/_4$ Zoll, doch sind bei den kleineren alle Hauptabmessungen sowie das Gewicht der bewegten Massen am Schreibgestänge und der Trommel durch tunliche Verschwächung aller Teile möglichst zu vermindern. Die Verringerung der zurückgelegten Wege und der Massen macht die Indikatoren für hohe Umlaufzahlen geeigneter, sowie für das Indizieren solcher Maschinengattungen, in denen besonders schnell verlaufende Druckänderungen vorkommen. Wie wir aus § 7 wissen und in § 90 genauer verfolgen werden, werden durch jede Druckänderung Schwingungen des Schreibzeuges ausgelöst, die sich über die Kurve des wahren Druckverlaufes lagern und deren Verlauf fast verdecken, wenn sie zu stark werden, das heißt wenn die Eigenschwingungszahl des Instrumentes zu klein ist im Vergleich zu den zu verfolgenden Änderungen. Eben die Eigenschwingungszahl legt man höher, indem man die bewegten Massen verkleinert. Der Einbau einer stärkeren Feder wirkt sehr energisch im gleichen Sinne.

Fig. 215 zeigt eine Ausführungsform kleinster Größe, wie sie für Automobil- und Flugzeugmotoren, also für Umlaufzahlen von 1200 und mehr und bei brisanten Zündungen, heute angewendet wird.

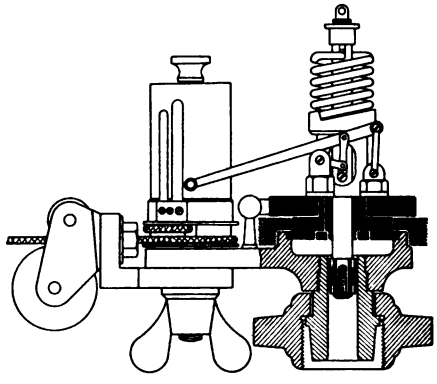


Fig. 215. Indikator für höchste Tourenzahlen von Maihak.

84. Handhabung des Indikators. Um eine Maschine zu indizieren, hat man zunächst den Indikator unter Zwischenschaltung des Hahnes an den Indikatorstutzen zu schrauben, gegebenenfalls den Hubminderer am Indikator oder der Maschine zu befestigen und dann den Schnurantrieb der Trommel instand zu setzen; da die Schnurdehnung Fehler ins Diagramm bringen kann, hat man zu vermeiden, was zu starker Schnurdehnung führt, insbesondere Reibung; die kleinen Führungsrollen am Minderer und am Indikator sind nicht zu starken Richtungsänderungen zu benutzen; die Schnur soll kurz sein, namentlich die vom Minderer zur Trommel, deren Dehnung unverkürzt ins Diagramm kommt. Wesentlich ist auch, daß die Schnur da, wo sie an den Kreuzkopf gehängt wird, zunächst parallel zur Kreuzkopfbewegung ist; sonst ändert sich der Winkel, mit dem sie abgeht, beim Hin- und Hergang, und die Trommelbewegung wird nicht proportional der Kreuzkopfbewegung. Späterhin kann die Schnur durch Rollen abgelenkt werden, doch soll das nicht unnötig geschehen.

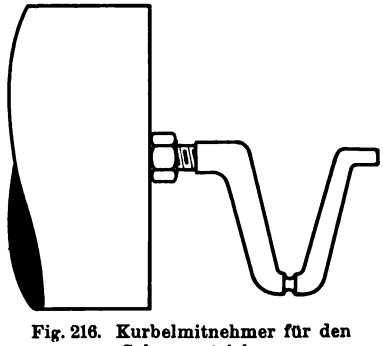


Fig. 216. Kurbelmitnehmer für den Schnurantrieb.

In vielen Fällen, namentlich an Diesel- und Gasmaschinen ohne besonderen Kreuzkopf, ist ein Punkt mit hin und her gehender Bewegung zur Abnahme der Trommelbewegung gar nicht vorhanden. Für häufige Indizierung sollte man auf Anbau eines kleinen Kurbeltriebes mit passendem Hub und gleichem Schubstangenverhältnis wie die Hauptkurbel sehen. Für gelegentliche Indizierung begnügt man sich meist damit, am Wellenende eine kleine Kurbel aus gebogenem Draht anzubringen (Fig. 216). Sie wird an der Stelle des Körners (in der Wellenmitte) eingeschraubt und mit Gegenmutter gesichert; die richtige Totpunktstellung aber wird durch Probieren ermittelt: man läßt durch Niederdrücken des Zündhebels oder (bei der Dieselmaschine) durch Absperren des Brennstoffes eine Zündung ausbleiben, die Expansionslinie muß dann in die Kompres-

sionslinie zurücklaufen. Da beim Entnehmen solcher Diagramme vom Kreuzkopf aus sich zeigt, daß die beiden Linien sich in Wahrheit gar nicht ganz decken, so ist die genannte Methode, den Totpunkt zu finden, ein Notbehelf, und zwar insofern ein schlechter, als durch etwas ungenaue Einstellung des Totpunktes die Diagrammfläche sich sehr stark ändert — besonders stark bei Dieselmaschinen. Die Einstellung des Totpunktes durch Bedienen der Gegenmutter in Fig. 216 ist nicht eben bequem; gelegentlich wird man das in Fig. 257, S. 309 für den optischen Indikator gegebene Einstellgetriebe verwenden können. Übrigens liegt ein Fehler bei der Verwendung von Fig. 216 darin, daß die abgenommene Bewegung unendlich langer Schubstange entspricht; führt man sie in passender Entfernung durch eine Öse oder um eine Rolle, so entspricht das wieder nicht einer konstanten Stangenlänge, ist aber immerhin besser. Die Rückführung der Kurbel in die Wellenachse (Fig. 216) erleichtert das Auflegen bei höheren Umlaufszahlen.

Wo man beide Seiten eines Zylinders indizieren will, führt man wohl gebogene Rohre zu einem Umschalthahn in der Zylindermitte

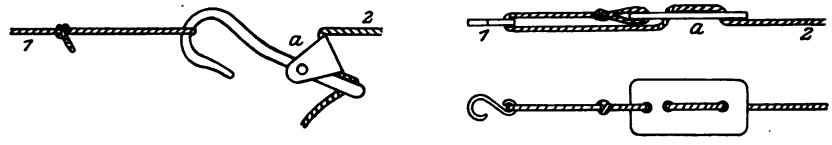


Fig. 217 und 218. Patenthaken und Schnurbrett zum Verbinden zweier Schnüre.

und baut an diesen den Indikator an; so kann man beide Seiten mit einem Indikator indizieren. Diese Anordnung ist nur für langsam laufende Maschinen zulässig; der Widerstand im Rohr läßt die Druckänderungen im Zylinder nicht richtig in den Indikator kommen, auch können stehende Wellen im Rohr zu den sonderbarsten Erscheinungen Anlaß geben. In jedem Fall ist die Verwendung zweier Indikatoren besser; auch dann soll die Bohrung des Hahnes und des Maschinenstutzens nicht zu eng sein, zumal bei Pumpen, wo noch die erhebliche Massenwirkung des Wassers hinzukommt, das in den Indikator ein- und austreten muß und in der Bohrung hohe Geschwindigkeiten annehmen kann (S. 303).

Meist treibt man den Indikator eines Zylinderendes vom Hubminderer, den des anderen Zylinderendes von der Trommel des ersten Indikators aus an. Noch mehr Indikatoren schalte man nicht in dieser Weise hintereinander, die Schnüre werden zu stark gespannt und reißen oft ab. Man mache sich zur Regel, erst die Minderungsrolle, dann den ersten Indikator, endlich den anderen korrekt in Gang zu bringen, in der Reihenfolge also, wie der Antrieb erfolgt. Die Bewegung der letzten Trommel stört man ja wieder, wenn man an der Minderungsrolle etwas ändert.

Der Haken (Fig. 217) und das Schnurbrett (Fig. 218) ergeben eine bequeme Verbindung zweier Schnurenden, deren Länge man dabei noch

leicht verändern kann. Fig. 217 ist nur da geeignet, wo die Schnur dauernd gespannt bleibt, z. B. zwischen zwei hintereinandergeschalteten Trommeln; wird die Schnur schlaff, so geht die Verbindung auseinander.

Nach dem Anbauen und öfter während des Betriebes überzeuge man sich durch Anlegen des Fingers, ob Trommeln und Minderungsrolle nicht gegen eine ihrer Hubbegrenzungen stoßen. Die Bewegungsumkehr am Hubende muß sanft und ohne Stoß erfolgen. Im Diagramm macht sich starkes Anstoßen kenntlich, wie Fig. 219 zeigt.

Nach Fertigstellung des Schnurantriebs wird das mit der richtigen Feder versehene Schreibzeug eingeschraubt.

Der Indikatorkolben wird vor dem Einsetzen geölt; das mitgelieferte sehr dünnflüssige Indikatoröl ist nur für niedere Temperaturen gut; bei Dampfzylindern verwendet man besser Lageröl, beim Hochdruckzylinder einer Heißdampfmaschine tut das dickflüssige Zylinderöl gute Dienste, da es in der Wärme dünn genug wird. Nach der Benutzung ist selbstverständlich der ganze Indikator zu säubern, und die Stahlteile, Feder und Kolbenstange, sind leicht zu ölen, um Rosten zu verhüten.

Um nun ein *Diagramm aufzunehmen*, wird Papier aufgespannt, die Schnur eingehängt oder die Anhaltevorrichtung gekuppelt und dann bei noch geschlossenem Indikatorhahn die Atmosphärenlinie geschrieben.

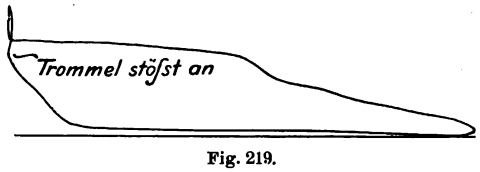


Fig. 219.

Hierbei stellt man zugleich die Anschlagschraube so ein, daß der Schreibstift nur feine Linien schreibt, damit das Diagramm sicherer auszumessen ist, und namentlich weil die Reibung des Schreibstiftes recht störend werden kann. Man zieht den Schreibstift wieder von der Trommel, öffnet den Indikatorhahn und schreibt nun das eigentliche Diagramm — im allgemeinen nur eines, je nach Umständen aber, namentlich bei Gasmaschinen, auch mehrere, deshalb nämlich, weil bei Gasmaschinen die einzelnen Diagramme so sehr voneinander verschieden sind, daß ein einzelnes Diagramm weit vom Durchschnitt abweichen könnte. Man nimmt so viel Diagramme, daß der Durchschnitt gesichert zu sein scheint, also um so mehr, je mehr die Diagramme zerstreut sind, meist nicht über fünf auf ein Blatt, weil man sonst die einzelnen nicht mehr gut verfolgen kann. Nach Fertigstellung des Diagramms vermerkt man auf ihm jedenfalls die Zeit der Aufnahme, die sicherer als Nummern die zusammengehörigen Diagramme kennzeichnet; ferner notiert man auf dem ersten Diagramm nach eingetretener Änderung oder auch auf jedem Diagramm Federmaßstab, Umlaufzahl, Belastung der Maschine oder was sonst wissenswert erscheint, soweit die Zahlen nicht in ein besonderes Versuchsprotokoll kommen.

Jedes Diagramm betrachte man nach der Aufnahme kritisch daraufhin, ob der Indikator und sein Antrieb in Ordnung war, damit das Diagramm wirklich über den Zustand der Maschine Auskunft gibt. So überzeuge man sich, ob nicht etwa der Kolben festhängt; jede

wagerechte Gerade ist in dieser Hinsicht verdächtig, da das Diagramm eines leicht gehenden Indikators überall Wellen, Knicke oder sonstige Feinheiten aufweist.

85. Auswertung des Diagramms. Das von einem Indikator verzeichnete Diagramm habe die Gestalt der Fig. 220. Sein Inhalt ist ein Maß für die Arbeit, das heißt, ein doppelt so großes Diagramm bedeutet eine doppelt so große Arbeit. Wie aber der Betrag der Arbeit oder besser gleich, wie unter Zuhilfenahme der minutlichen Umlaufzahl die Leistung der Maschine berechnet wird, das ist nun zu erörtern.

Der Quotient aus Flächeninhalt J des Diagramms und seiner Länge l heißt die mittlere Höhe desselben: $h_m^{\text{mm}} = \frac{J^{\text{qmm}}}{l^{\text{mm}}}$. Wollte man das Diagramm durch ein flächengleiches Rechteck von derselben Länge ersetzen, welches ja die gleiche Arbeit darstellte, so müßte das Rechteck diese Höhe h_m haben. Man mißt die Fläche mit dem Planimeter oder nach der Simpsonschen Regel und bestimmt den Abstand der beiden Lote, die man auf der Atmosphärenlinie so errichtet, daß sie das Diagramm berühren (Fig. 220).

Dividieren wir die mittlere Höhe des Diagramms durch den Federmaßstab m, so erhalten wir den *mittleren indizierten Druck* im Zylinder: $p_i^{\text{at}} = \frac{h_m^{\text{mm}}}{m^{\text{mm/at}}}$. Diese Größe gibt uns an, um wieviel beim Kolbenhingang die Spannung im Zylinder durchschnittlich größer war als beim Kolbenrückgang.

Nachdem wir p_i ermittelt haben, ist die Bestimmung der Maschinenleistung einfach: Bezeichnen wir mit F die wirksame Kolbenfläche der Maschine, mit s ihren Hub, mit n ihre minutliche Umlaufzahl, so ist $F \cdot p_i$ die mittlere Kolbenkraft und $F \cdot p_i \cdot s$ die bei einer Umdrehung — Hin- und Rückgang, weil ja p_i die Spannungsdifferenz aus Hin- und Rückgang ist — frei werdende Arbeit. Diese Arbeit wird in der Sekunde $\frac{n}{60}$ mal geliefert. Daher ist die *indizierte Leistung* für die eine Zylinderseite, der das Diagramm entstammt,

$$N_i^{\text{PS}} = \frac{F^{\text{qcm}} \cdot p_i^{\text{at}} \cdot s^{\text{mtr}} \cdot n^{\text{Uml/min}}}{60 \cdot 75} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Diese Formel gibt direkt die Maschinenleistung bei einfachwirkenden und einzylindrigen Maschinen. Bei doppeltwirkenden und bei mehrzylindrigen Maschinen hat man die Leistung jeder Zylinderseite und jedes Zylinders zu bilden und die einzelnen Leistungen zusammenzuzählen. Bei Verbrennungsmotoren mit Viertaktbetrieb dagegen hat man zu beachten, daß nur bei jedem zweiten Hingang des Kolbens eine Zündung erfolgt, nur ein Viertel der Hübe liefert Arbeit, daher hat man $\frac{1}{2} n$ statt n in jene Formel einzuführen; wir sprechen sogleich besonders über die Auswertung der Viertaktdiagramme.

Beispiel: So sind für eine Dreifachexpansionsmaschine das vordere und hintere Diagramm des Hochdruckzylinders gegeben; die Zylinderabmes-

sungen sind: Zylinderdurchmesser 320 mm, Kolbenstangendurchmesser (nur vorn) 80 mm, Hub 650 mm. Die auf den Diagrammen gemachten

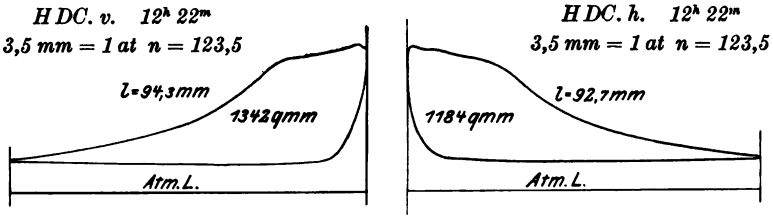


Fig. 220. Diagramme beider Seiten des Hochdruckzylinders einer Verbund-Dampfmaschine[1]).

Notizen und Ausmessungsergebnisse führen auf folgende Zusammenstellung:

		vorn (Kurbelseite)	hinten (Deckelseite)
Mittlere Diagrammhöhe	h_m	$\frac{1342}{94,3} = 14,24$ mm	$\frac{1184}{92,7} = 12,78$ mm
Mittlerer ind. Überdruck	p_i	$\frac{14,24}{3,5} = 4,07$ at	$\frac{12,78}{3,5} = 3,65$ at
Wirksame Kolbenfläche	F	$804,2 - \frac{8,0^2 \cdot \pi}{4} = 753,9$ qcm	$\frac{32,0^2 \cdot \pi}{4} = 804,2$ qcm
Min. Umlaufzahl .	n	123,5	123,5
Maschinenhub. . .	s	0,650 m	0,650 m
Indizierte Leistung	N_i	$\frac{753,9 \cdot 4,07 \cdot 0,650 \cdot 123,5}{60 \cdot 75} =$ $= 54,8$ PS	$\frac{804,2 \cdot 3,65 \cdot 0,650 \cdot 123,5}{60 \cdot 75} =$ $= 52,4$ PS
		zusammen: $N_h = 107,2$ PS$_i$.	

Da die entsprechende Auswertung beim Mitteldruckzylinder $N_m = 81,6$ PS$_i$ und beim Niederdruckzylinder $N_n = 110,3$ PS$_i$ ergeben hatte, ist die Gesamtleistung der Maschine $N = 107,2 + 81,6 + 110,3 = 299,1$ PS$_i$.

Wir haben oben mit F die *wirksame Kolbenfläche* bezeichnet. Für ihre Berechnung ist die Gestaltung des Kolbens, etwa das Vorhandensein einer Kolbenmutter (Fig. 221 links) ohne Einfluß. Die wirksame Kolbenfläche ist $\frac{D^2 \pi}{4}$, wo D den Zylinderdurchmesser bedeutet, nicht den Kolbendurchmesser, der meist kleiner ist. Wenn aber eine Kolbenstange durch eine Stopfbüchse hindurch nach außen geht (Fig. 221 rechts), so ist die Fläche der Kolbenstange abzuziehen, auf sie

[1]) Die Diagramme haben, wie im folgenden alle, halbe Originalgröße, also $1/4$ Flächeninhalt des Originals; an Sauberkeit der Zeichnung haben alle Diagramme durch das Nachziehen mit der Hand eingebüßt.

wirkt p_i nicht ein, es ist hier $^1/_4 D^2\pi - {}^1/_4 d^2\pi$ die wirksame Kolbenfläche. Die Kolbenfläche ist also vorn und hinten verschieden. Der Zylinderdurchmesser ist bei alten Maschinen, der Abnutzung wegen, stets größer, als in der Zeichnung angegeben. Er ist in warmem Zustande größer als im kalten und daher warm zu messen. — Bei Plungerkolben ist $^1/_4 D^2\pi$ die wirksame Kolbenfläche, wo D der Plungerdurchmesser.

Der *Maschinenhub* ist gleich dem doppelten Kurbelradius nur dann, wenn kein Spiel in Kreuzkopf- und Kurbellager vorhanden ist. Unterschiede von einigen Millimetern zwischen dem wirklichen Hub und dem der Zeichnung entnommenen kommen vor. — Bei schwungradlosen Maschinen, Duplexpumpen und dergleichen, ist der Hub wechselnd, zumal abhängig von der Tourenzahl. Man bestimmt am besten das Verhältnis der Diagrammlänge zur Hublänge durch Ausmessen, nicht aus den Abmessungen der Reduktionstrommeln. Dies Verhältnis ändert sich aber der Schnurdrehung wegen bei verschiedenen Tourenzahlen.

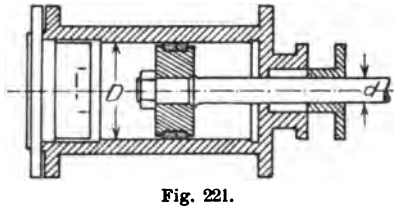


Fig. 221.

Geht eine Maschine sehr gleichmäßig, so genügt es, jedesmal einzelne Diagramme zu nehmen. Wo aber die einzelnen Diagramme nicht identisch sind, da muß man immer ein *Bündel* von etwa fünf Diagrammen auf ein Blatt nehmen, um einen brauchbaren Mittelwert der Diagrammfläche zu bekommen. Das ist der Fall bei *Verbrennungsmaschinen*. Fig. 222 zeigt ein Gasmaschinendiagramm mit fünf Einzeldiagrammen.

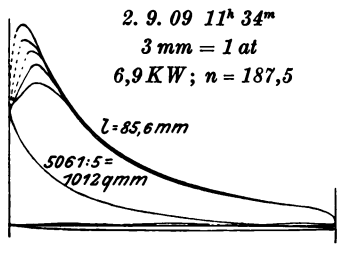


Fig. 222. Diagrammbündel

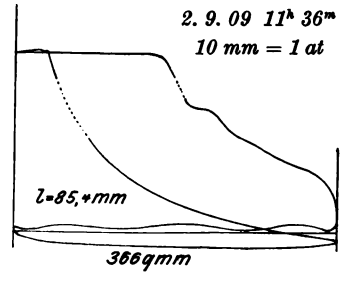


Fig. 223. Schwachfederdiagramm

beide von einer Viertakt-Gasmaschine.

Man ermittelt die Diagrammfläche, indem man alle fünf Diagramme in einem Zug planimetriert und daher zum Schluß die Gesamtfläche abliest; diese, durch die fünffache Länge geteilt, ergibt die mittlere Diagrammfläche des Bündels.

Nun ist freilich bei den Diagrammen von Viertaktgasmaschinen noch eines zu bedenken. Man erkennt nämlich in Fig. 222, daß das Diagramm eigentlich aus zwei Flächen besteht; die untere schmale liegt zu beiden Seiten der Atmosphärenlinie und ist im umgekehrten Sinne wie die obere vom Schreibstift umfahren, so daß das ganze Diagramm eine

verzerrte 8 darstellt. Der umgekehrte Umfahrungssinn deutet an, daß in dieser Fläche nicht eine Arbeitsleistung, sondern ein Arbeitsverbrauch zu erblicken ist; in der Tat entsprechen die Linien zu beiden Seiten der Atmosphärenlinie dem Ausstoßen des verbrannten und dem Ansaugen frischen Gemisches, Vorgänge, die natürlich Arbeit erfordern. Als indizierte Leistung der Maschine ist nun der Unterschied der in der Hauptfläche erzeugten und der in der schmalen Fläche verbrauchten Arbeit anzusehen[1]). — Zur Auswertung braucht man nur das Diagramm Fig. 222 mit dem Planimeterfahrstift so zu umfahren, wie der Indikatorstift es tat, eine 8 beschreibend; dann bildet das Planimeter von selbst den Unterschied der Arbeits- und der Verlustfläche, und man kann mit ihr die Leistung wie bei Dampfmaschinen berechnen, mit der Maßgabe, daß nur bei jedem zweiten Umlauf diese Arbeit frei wird, so daß man mit $\frac{1}{2}\,n$ statt mit n zu rechnen hat. Nun ist aber das fünfmalige Umfahren der kleinen Fläche langwierig; auch ist das Planimetrieren so schmaler Flächen unsicher, da die Ungenauigkeit des Umfahrens leicht größer wird als der Flächeninhalt; auch sind die einzelnen Linien gar nicht immer so sauber zu erkennen wie in Fig. 222. Man nimmt deshalb gern außer dem Hauptdiagramm, das man nur zur Bestimmung der Arbeitsfläche benutzt, noch ein *Schwachfederdiagramm*, Fig. 223, auf, das die Verlustfläche deutlicher zeigt und sicher auswerten läßt. Das Schwachfederdiagramm wird mit einer Feder von so großem Federmaßstab aufgenommen, daß nur der untere Teil des Diagramms aufs Papier kommt, der obere aber durch Anstoßen des Indikatorkolbens an den Deckel unterdrückt wird; man muß darauf bedacht sein, daß das Anstoßen an den Deckel während der allmählich verlaufenden Kompression stattfindet, nicht nach der Zündung, wo die schnelle Drucksteigerung zu starken Schlägen führt. Nötigenfalls begrenzt man den Kolbenhub beim Rosenkranz-Indikator, Fig. 194, durch auf die Kolbenstange geschobene kleine Hülsen; die Indikatoren Fig. 199 und 207 haben dazu eine besondere verstellbare Hubbegrenzung.

Beispiel: Die Auswertung solchen Diagrammpaares geht nun folgendermaßen vor sich: In Fig. 222 ergab fünfmaliges Umfahren der Arbeitsfläche die Ablesung 5061 qmm; die Diagrammfläche ist mit $5061 : 5 = 1012$ qmm anzunehmen, die Diagrammlänge ist 85,6 mm. Die mit dem 20 mm-Kolben (beim kleinen Rosenkranz-Indikator) verwendete Feder hat den Federmaßstab 3 mm = 1 at; also wird $h_{m_1} = \frac{1012}{85{,}6} = 11{,}83$ mm und $p_{i_1} = \frac{11{,}83}{3} = 3{,}94$ at. In Fig. 223 ergab einmaliges Umfahren der Verlustfläche 366 qmm; die Diagrammlänge ist 85,4 mm, es wurde eine Feder 10 mm = 1 at verwendet; also wird $h_{m_2} = \frac{366}{85{,}4} = 4{,}29$ mm und $p_{i_2} = \frac{4{,}29}{10} = 0{,}429$ at. Aus beiden Diagrammen zusammen haben wir $p_i = 3{,}94 - 0{,}429 = 3{,}51$ at wirk-

[1]) Man vergleiche über diese Frage die Diskussion Z. d. V. D. Ing. 1905, S. 331, 517, 814, 1044. Seitdem ist dieses Abzugsverfahren durch die Normen für Leistungsversuche an Gasmaschinen als allein gültig festgestellt.

samen Überdruck für zwei Umläufe; Zylinderdurchmesser 250 mm, also $F = 490{,}9$ qcm; Hub 450 mm, also $s = 0{,}450$ m; Umlaufzahl $n = 188{,}3$ Uml/min; damit wird

$$N = \frac{\frac{1}{2} \cdot 490{,}9 \cdot 3{,}51 \cdot 0{,}450 \cdot 188{,}3}{60 \cdot 75} = 16{,}3 \text{ PS}_\text{i}.$$

Diagramme sind zu nehmen von allen Räumen, in denen sich Kolben bewegen, die Arbeit leisten oder aufnehmen könnten, bei *Stufenkolbenpumpen* daher auch vom Raum hinter den Druckventilen, in dem der Stufenkolben sich bewegt. Das dort genommene Diagramm ist eine liegende Acht, oft sehr flach und ganz ohne Fläche, oft mit zwei einander gleichen Flächen, die einander aufheben und beim Planimetrieren etwa Null ergeben. Oft aber auch sind die beiden Hälften der Acht so verschieden, daß merkliche positive oder negative Arbeiten auf den Stufenkolben entfallen; dessen Fläche pflegt etwa halb so groß zu sein wie die eigentliche Plungerfläche; es ist sorgsam zu überlegen, ob die der Diagrammfläche entsprechende Arbeit von der des Plungers abzuziehen oder zu ihr hinzuzuzählen ist, ob also der Stufenkolben beim Ein- oder beim Ausgang größeren Druck erfuhr.

Über die Berücksichtigung des Arbeitsverbrauchs der Spül- und Ladepumpen bei *Zweitakt-Verbrennungsmaschinen*, der *Einblasepumpen* bei *Dieselmaschinen*, der *Kondensations- und Speisepumpen bei Dampfkraftanlagen*, kurzum aller *Hilfszylinder* wird in den „Maschinenuntersuchungen" berichtet. Grundsätzliches darüber findet man in Stodola, Z. d. V. D. I. 1905, S. 517.

86. Auswertung bei Dauerversuchen. Es könnte einfacher scheinen, statt erst h_m und den mittleren Druck p_i zu berechnen, und nun die Formel $N_i = \frac{F \cdot p_i \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75}$ anzuwenden, die ganze Rechnung durch eine einzige Formel zu erledigen, die unmittelbar die gemessenen Größen: Federmaßstab, Diagrammfläche und -länge, enthalten würde.

Der angegebene Rechnungsgang ist aber allgemein üblich und sehr zweckmäßig. p_i ist eine zur Beurteilung der Maschine wertvolle Größe, die man gern kennt. Besonders aber spart die Berechnungsweise viel Arbeit, sobald es sich um Auswertung einer großen Anzahl von Diagrammen handelt, die fortlaufend, etwa von 5 zu 5 Minuten, aufgenommen wurden, und aus denen man für eine längere Versuchsdauer die durchschnittlich indizierte Leistung finden will.

Da weder die Diagrammlänge, noch der Inhalt, noch selbst die Umlaufzahl der Maschine konstant bleibt, so müßte man korrekterweise aus jedem Diagramm das jeweilige p_i ermitteln und unter Benutzung der jeweiligen Umlaufzahl die jeweilige Leistung finden. Aus allen diesen Leistungen hätte man dann den Durchschnittswert zu bilden. Das wäre sehr zeitraubend. Statt dessen rechnet man bequemer mit dem Durchschnittswert aller p_i und mit der durchschnittlichen Umlaufzahl und hat nur eine Rechnung auszuführen statt vieler. Daß solche Rechnungsweise ungenaue Ergebnisse liefert, ist auf S. 25 be-

sprochen worden. Aber die Einzelwerte von p_i und von n pflegen so wenig zu schwanken, daß man ruhig das Produkt der Mittelwerte mit dem Mittelwert der Produkte verwechseln kann.

Man kann die Rechnung oft noch weiter vereinfachen: Man kann gleich den Durchschnittswert der Diagrammflächen und den der Längen bilden und den Durchschnittswert aller p_i durch einmaliges Bilden des Quotienten erhalten, statt p_i für jedes Diagramm zu berechnen; das ist nicht ganz so oft zulässig. Auch die Kolbenflächen eines doppeltwirkenden Zylinders sind bei größeren Maschinen so wenig voneinander verschieden, daß man eine mittlere Kolbenfläche F_m, Mittel aus vorn und hinten, einführen und so gleich die Gesamtleistung des Zylinders finden kann; man verwendet dann die Formel $N_i = 2 \cdot \frac{F_m \cdot p_i \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75}$, wo die 2 die doppelte Wirkung des Zylinders in Rechnung zieht.

Zweckmäßig ist es, alle diejenigen Größen zur sogenannten *Zylinderkonstanten* zusammenzufassen, die von den Abmessungen und der Eigenart der Maschine abhängen. Es ist dann $N_i = C \cdot p_i \cdot n$. Dabei ist $C = 2 \cdot \frac{F_m \cdot s}{60 \cdot 75} = \frac{(F_v + F_h) \cdot s}{60 \cdot 75}$ für doppeltwirkende, $C = \frac{F \cdot s}{60 \cdot 75}$ für einfachwirkende Maschinen; $C = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot s}{60 \cdot 75}$ für einfachwirkende Viertaktmaschinen.

All dieses wird durch das *Beispiel eines Dampfverbrauchsversuches* am besten veranschaulicht werden.

Doppeltwirkende Einzylinderdampfmaschine ohne Kondensation, Durchmesser des Zylinders 300 mm, der Kolbenstange (nur vorn) 35 mm, Hub 400 mm. Zylinderkonstante vorn 0,0620; hinten 0,0628. Federmaßstab vorn 8,1 mm/at, hinten 7,8 mm/at. Belastung durch Bremse, konstant gehalten, 1,0 m × 97,5 kg = 97,5 mkg. Versuchsdauer $4^h\,0$ bis $5^h\,0$, Ablesung alle 10 Minuten.

Zeit	Zählwerk Stand	Zählwerk Diff.	Wage Stand	Wage Diff.	Diagrammfl. vorn	Diagrammfl. hinten	Diagrammlge. vorn	Diagrammlge. hinten	Mittl. Höhe vorn	Mittl. Höhe hinten
			kg		qmm		mm		mm	
$4^h\,0$	6341		63,1		1130	1200	102,5	100,1	11,02	11,99
10	7093	752	84,3	21,2	1170	1210	103,1	101,0	11,33	11,98
20	7848	755	105,7	21,4	1140	1200	102,9	100,9	11,08	11,90
30	8599	751	126,9	21,2	1120	1170	103,2	101,0	10,83	11,58
40	9346	747	148,0	21,1	1110	1160	103,2	101,2	10,75	11,46
50	0091	745	169,1	21,1	1120	1180	103,5	101,3	10,81	11,63
$5^h\,0$	0841	750	190,3	21,2						
Mittelwert	4500 : 60		127,2 kg/st						10,95	11,74

$= 75{,}0$ Uml/min.

Man berechnet nun die indizierte Leistung wie folgt: Mit Hilfe der Federmaßstäbe berechnet man den mittleren Überdruck[1]) der Dia-

[1]) Es handelt sich eigentlich um den mittleren Wert von p_i, also um den mittleren mittleren Überdruck (eine Art Doppelintegral).

gramme vorn $p_i = \frac{10{,}95}{8{,}1} = 1{,}35$ at und hinten $p_i = \frac{11{,}74}{7{,}8} = 1{,}51$ at. Mit Hilfe der Zylinderkonstanten ergibt sich die mittlere Leistung vorn $N_v = 0{,}0620 \cdot 1{,}35 \cdot 75{,}0 = 6{,}30$ PS$_i$ und hinten $N_h = 0{,}0628 \cdot 1{,}51 \cdot 75{,}0 = 7{,}08$ PS$_i$; gesamte mittlere indizierte Leistung $N_i = 13{,}38$ PS.

Da weiterhin der stündliche Dampfverbrauch 127,2 kg ist, so berechnet sich derselbe für die Leistungseinheit, den wir als *spezifischen Dampfverbrauch* bezeichnen können, zu $\frac{127{,}2}{13{,}38} = 9{,}53 \frac{\text{kg}}{\text{PS}_i \cdot \text{st}}$. Und da die effektive oder Bremsleistung sich zu $N_e = \frac{97{,}5 \cdot 75{,}0}{716} = 10{,}2$ PS berechnen läßt, so ergibt sich der spezifische Dampfverbrauch, bezogen auf die Nutzleistung, zu $\frac{127{,}2}{10{,}2} = 12{,}5 \frac{\text{kg}}{\text{PS}_e \cdot \text{st}}$. Auch läßt sich noch der mechanische Wirkungsgrad mit $\eta_{\text{mech}} = \frac{10{,}2}{13{,}38} = 0{,}76$ angeben.

Die Auswertung der indizierten Leistung kann nun mit fast immer genügender Genauigkeit, wenn auch theoretisch nicht genau, in viel einfacherer Weise, als oben angegeben, geschehen. Man erspart sich das langwierige Ausrechnen der beiden letzten Spalten unserer Tabelle, wenn man so vorgeht: Diagrammfläche, Mittel aus allen Diagrammen vorn und hinten 1160 qmm; Diagrammlänge ebenso 102,0 mm; also im Mittel $h_m = 11{,}38$ mm. Federmaßstab, Mittel aus vorn und hinten 7,95 mm = 1 at, also im Mittel $p_i = 1{,}43$ at. Zylinderkonstante, Summe aus vorn und hinten, $C = 0{,}1248$. Also wird $N = 0{,}1248 \cdot 1{,}43 \cdot 75{,}0 = 13{,}39$ PS$_i$. Diese vereinfachte und viel Zeit sparende Methode darf man nur dann anwenden, wenn die Größen, aus denen man die Mittel nimmt, nicht allzusehr voneinander abweichen (S. 25). Nie dürfte man beispielsweise auf den Gedanken kommen, bei Berechnung der Leistung einer Verbundmaschine eine mittlere Zylinderkonstante für Hoch- und Niederdruckzylinder zu bilden; hier ist unbedingt die Leistung jedes einzelnen Zylinders zu bilden.

Zu der Tabelle S. 271 wäre noch zu bemerken, daß es recht zweckmäßig ist, so, wie dort geschehen, die Diagrammaufnahme immer mitten zwischen zwei Ablesungen des Zählwerks und der Wage zu machen, also um 4 h 5, 4 h 15 . . .; denn das Diagramm soll den Mittelwert über die Zeit von 4 h 0 bis 4 h 10... darstellen. Im allgemeinen ist die Ablesung der Instrumente, die Momentanwerte angeben, gegen die Ablesung der integrierenden Instrumente (§ 12) um die halbe Ablesungsdauer zu versetzen; man umgeht dann insbesondere auch Unstimmigkeiten, die sonst auftreten, wenn man bei langdauernden Versuchen Stundenabschlüsse macht; die zur vollen Stunde abgelesenen Momentanwerte gehören weder zur vergangenen noch zur kommenden Stunde. Die Nachregelung der Bremse hat am besten zugleich mit der Ablesung der integrierenden Instrumente zu erfolgen, also um 4 h 10, 4 h 20..., oder aber, wenn das zu selten ist, um 4 h $2^1/_2$, 4 h $7^1/_2$... Durch planmäßiges Vorgehen in diesen Hinsichten läßt sich die Meß-

genauigkeit sehr steigern. Die Ablesung der integrierenden Instrumente, Zählwerk und Wage, ist allerdings eigentlich nur am Anfang und Ende des ganzen Versuches nötig; die Zwischenablesungen geben aber durch die Möglichkeit der Differenzbildung eine Kontrolle über die Gleichmäßigkeit des Ganges und über die Genauigkeit der Ablesung, und retten, wenn gegen Ende der beabsichtigten Versuchsdauer eine Störung eintritt, wenigstens einen Teil des Versuches.

87. Federmaßstab, Eichung. Auf der Indikatorfeder ist ein Federmaßstab angegeben. Diese Angabe ist eine glatte Zahl und für genauere Versuche nicht ausreichend, zumal der Federmaßstab sich im Lauf der Zeit ändert. Man muß vielmehr die Feder eichen und den Federmaßstab durch Versuch feststellen. Die Eichung kann auf zweifache Art geschehen.

Bei der *Spannungseichung* bringt man, von der atmosphärischen ausgehend, verschiedene Spannungen etwa in Stufen von 1 zu 1 Atmosphäre unter den Indikatorkolben und verzeichnet auf der Papiertrommel wagerechte Linien, deren Abstand man auf $^1/_{10}$ mm genau ausmißt. Daraus hat man direkt den Federmaßstab. Man führt eine Reihe Versuche bei steigendem, eine bei fallendem Druck aus; zwischen beiden Ergebnissen wird infolge der Reibung ein Unterschied bestehen, der nicht zu groß sein darf. Man nimmt aus beiden das Mittel. Man kann die Kolbenpresse, S. 66, benutzen.

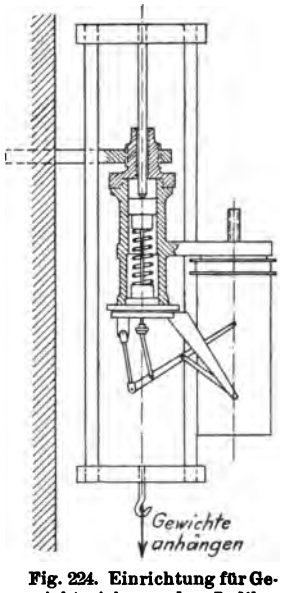


Fig. 224. Einrichtung für Gewichtseichung der Indikatorfedern von Bollinckx.

Bei der *Gewichtseichung* belastet man mit Gewichtsstücken. Dazu kann etwa die Vorrichtung Fig. 224 dienen, bei der die Gewichte an ein Gehänge gehängt werden, das um den umgekehrt aufgehängten Indikator herumführt. Wieder zieht man wagerechte Striche auf dem Indikatorpapier; zweckmäßig klopft man vorher mit einem Holzhammer gegen den Indikator, um die Reibung zu vermindern; im Betriebe ist sie ja auch nur klein, der fortdauernden Erschütterungen wegen, und weil die der Bewegung in Frage kommt.

Andere Apparate zur Ausführung der Eichung findet man in Forschungsarbeiten, Heft 46—47, und Z. d. V. D. Ing. 1902, S. 1575, zusammengestellt.

Bei der Gewichtseichung muß man die Fläche des Indikatorkolbens messen, um die der Gewichtsbelastung entsprechende Spannung ausrechnen zu können. Die Spannungseichung bedarf der subtilen Messung des Kolbendurchmessers nicht. Bei beiden Arten der Eichung ist aber zu beachten, daß die Kolbenfläche zunimmt, wenn der Kolben warm wird, und zwar um etwa 0,4% für 100° Tomperaturzunahme. Ein Indikator, für den man kalt den Federmaßstab 8,20 mm/at fand, wird

bei einer geschätzten Temperatur des Kolbens von 120° (statt früher 20°) den Federmaßstab $8{,}20 \cdot \left(1 + \frac{0{,}4}{100}\right) = 8{,}24 \frac{\text{mm}}{\text{at}}$ haben. Diese geringe und leidlich zuverlässige Korrektion ist bei Gewichtseichungen auf jeden Fall nötig, und bei Spannungseichung nur dann nicht, wenn man den Kolben bei der Eichung auf die Temperatur der späteren Benutzung gebracht hat; man darf sie nicht verwechseln mit jenen größeren Berichtigungen, die man wohl zur Berücksichtigung der Federerwärmung angegeben findet, und die nur auf recht unsicheren Grundlagen ruhen, durch die Einführung der Kaltfederinstrumente aber überflüssig geworden sind.

Die Temperaturwechsel haben nämlich noch einen zweiten Einfluß auf den Federmaßstab: Steigen der Temperatur macht die Feder nachgiebiger und vergrößert daher den Federmaßstab. Eine hierauf bezügliche Berichtigung läßt sich dadurch umgehen, daß man Kaltfederinstrumente verwendet; die Erkenntnis, daß bei Änderungen der Temperatur um 1040° Änderungen des Federmaßstabes um etwa 4% einzutreten pflegen, ist für die in den letzten Jahren erfolgte Einführung der Kaltfederinstrumente maßgebend gewesen; man erkannte nämlich, daß es unmöglich ist, diesem Einfluß durch eine Korrektion gerecht zu werden, weil ja die Temperatur der Feder eines Warmfederindikators sehr von den Umständen und der Behandlung des Indikators abhängt, die beim Eichen nicht leicht dieselben sein werden wie im späteren Gebrauch. Beim Eichen unter Dampfdruck steht der Dampfdruck und damit die Temperatur dauernd auf dem Indikator, beim Indizieren nur während eines Teiles des Maschinenumganges. — Wo man Warmfederinstrumente zum Indizieren warmer Medien benutzen will, da soll man — nach den vom Verein Deutscher Ingenieure aufgestellten Normen — eine kalte Eichung und eine zweite bei einer wohlbekannten Temperatur vornehmen, am einfachsten bei 100°, denn diese Temperatur läßt sich durch Umspülen der Feder mit Wasserdampf bei Atmosphärendruck am leichtesten herstellen. Ein der Diagrammauswertung zugrunde zu legender Federmaßstab ist dann durch Interpolieren oder Extrapolieren unter Schätzung der Federtemperatur zu finden — doch nur als Notbehelf.

Wir erinnern noch daran, daß die Korrektion wegen der Kolbenerwärmung für Kalt- und Warmfederinstrumente gilt und nur bei warmer Spannungseichung überflüssig wird; daß aber die Korrektion wegen der Federerwärmung nur für Warmfederinstrumente nötig ist.

Ob *Spannungs- oder Gewichtseichung besser* sei, darüber ist viel gestritten worden. Legt man auf die Vorzüge der einen oder der anderen Art zu großes Gewicht, so schätzt man wohl die Genauigkeit des Indikators zu hoch ein. Der Unterschied zwischen beiden verschwindet bei nicht sehr sorgfältiger Behandlung des Indikators hinter anderen Fehlerquellen. Gegen die Spannungseichung, an sich die näherliegende, wendet man ein, daß sie die Reibung im Indikator übertrieben groß erscheinen lasse, und daß dadurch das Ergebnis getrübt werde. Beim Eichen nämlich komme die Reibung der Ruhe, im Betriebe aber die

der Bewegung in Betracht, und letztere ist bekanntlich kleiner. Im Betrieb ist der Indikator dauernd Erschütterungen ausgesetzt, welche die Reibung vermindern, und diese Erschütterungen werden durch die auf und ab gehenden Schwingungen bei der Gewichtseichung nachgeahmt. — Der Gewichtseichung wiederum wirft man namentlich die Unsicherheit vor, die bei der Messung des Kolbendurchmessers auftritt. Ein Irrtum von $^1/_{10}$ mm bedeutet einen Fehler von $^1/_2$% des Durchmessers, also 1% der Fläche. Freilich braucht solch großer Irrtum bei einer Mikrometermessung nicht unterzulaufen. Ferner ändert sich die Kolbenfläche mit der Temperatur, um 0,4% bei 100° Temperaturänderung; auch die Temperatur ist aber nur ungenau bekannt. Endlich soll der Kolben im Indikatorzylinder lieber zu leicht gehen und Dampf entweichen lassen, als große Reibung haben. Dann ist also der Zylinderdurchmesser größer als der des Kolbens, und der enge Ringraum zwischen Kolben und Zylinder wäre wohl teilweise zum Kolben zu zählen. Jede einzelne dieser Unsicherheiten ist nicht gerade bedeutend, zusammen sind sie immerhin zu beachten.

Verfasser persönlich neigt mehr dazu, die Spannungseichung wenigstens für nicht ganz kleine Spannungen vorzuziehen, weil sie doch die Umstände des praktischen Betriebes besser annähert; im allgemeinen ist man neuerdings anderer Ansicht.

Insbesondere ist durch die vom Verein Deutscher Ingenieure aufgestellten *Bestimmungen*[1]) *über die Feststellung der Maßstäbe von Indikatorfedern* die Gewichtseichung als für die Praxis vorzuziehen festgelegt. Da diese Regeln in manchem nicht unserer Darstellung der Verhältnisse entsprechen, so mögen sie hier wiedergegeben werden:

1. Jeder Indikator, dessen Federn geprüft werden sollen, ist vorher auf seinen Zustand, insbesondere hinsichtlich Kolbenreibung, Dichtheit und auf toten Gang des Schreibzeuges zu untersuchen.
2. Die Indikatorfedern sind durch Gewichtsbelastung zu prüfen.
3. Die Federn sind in Verbindung mit dem Schreibzeug zu prüfen.
4. Jede Feder, die beim Gebrauch des Indikators höhere Temperaturen annimmt, ist im allgemeinen kalt und warm bei etwa 20° C (Zimmertemperatur) und bei 100° C zu prüfen.
5. Die Federn sind mit mehrstufiger Belastung zu prüfen, und zwar in mindestens fünf Stufen oberhalb der atmosphärischen Linie und in wenigstens drei Stufen unterhalb derselben. In den Prüfschein sind alle Einzelwerte der Untersuchung aufzunehmen.
6. Der Durchmesser des Indikatorkolbens wird bei Zimmertemperatur gemessen.

Es ist zu bedenken, daß solche Regeln insbesondere Einheitlichkeit schaffen und leicht ausführbare Formen der Prüfung vorschreiben sollen. Man wird sich für praktische Versuche an sie halten und auf sie berufen können, wird aber für wissenschaftliche Zwecke, entsprechend unseren Darlegungen, nach Befund von ihnen abweichen dürfen.

Es scheint auch nicht überflüssig zu sein, gelegentlich beide Eichungen anzuwenden: Man prüft durch Gewichtseichung die *Gleichmäßigkeit*

[1]) Nebst Erläuterungen veröffentlicht Z. d. V. d. Ing. 1906, S. 709.

der Feder; bei dieser Prüfung spielen Kolbendurchmesser und die anderen Unsicherheiten keine Rolle; und man stellt durch Spannungseichung den Federmaßstab fest; dabei braucht man nur einige weit voneinander liegende Spannungen anzuwenden. Mit anderen Worten: Für Ermittlung des mittleren Federmaßstabes scheint die Spannungseichung die bessere zu sein, den Verlauf des wahren Federmaßstabes läßt die Gewichtseichung besser erkennen.

Der Federmaßstab ist nämlich nicht immer für alle Drucke derselbe. Bei der Eichung entsteht auf dem Papier ein Bild wie Fig. 225, das wir als Eichdiagramm bezeichnen können. Wenn wir die Abstände jeder Linie von der Nullinie messen, durch Bildung der Mittelwerte zwischen Aufwärts- und Abwärtsgang den Einfluß der Reibung eliminieren und dann die Unterschiede bilden, so erkennen wir, neben kleinen Unstetigkeiten, die wir wechselnder Reibung zuschreiben, eine deutliche Abhängigkeit des Federmaßstabes vom Druck; in Fig. 225 nimmt der Federmaßstab mit wachsendem Druck ab.

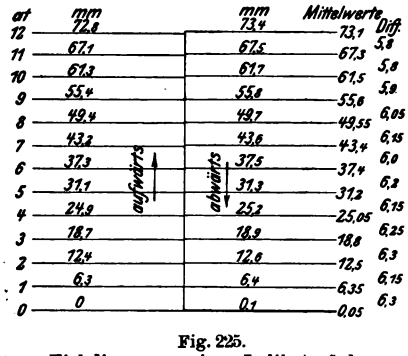


Fig. 225.
Eichdiagramm einer Indikatorfeder.

Berechnet man nun den Federmaßstab, so daß man den Abstand etwa der 1 at-Linie von der 11 at-Linie ausmißt und durch 11 — 1 = 10 teilt, so nennt man das Ergebnis den *mittleren Federmaßstab* zwischen 1 und 11 at. In Fig. 225 wäre das $\frac{1}{10} \cdot (67{,}3 - 6{,}53) = 6{,}09$ mm/at. Diese Angabe läßt nicht erkennen, ob die Feder sich gleichmäßig zusammendrückte, so daß gleichen Druckintervallen überall gleiche Schreibstiftwege entsprachen. Etwas genauer wird die Angabe schon, wenn wir den Federmaßstab zwischen 1 und 6, zwischen 6 und 11 at je getrennt angeben. Das ergäbe 6,19 und 5,98 mm/at, und wir erkennen deutlich, daß der Federmaßstab abnimmt. Das ist ein Fehler, der Federmaßstab soll konstant sein. Je enger wir die Intervalle ziehen, desto besseren Aufschluß erhalten wir über die Gleichmäßigkeit der Feder. Den Federmaßstab, den wir aus einer unendlich kleinen Spannungszunahme dp und dem zugehörigen unendlich kleinen Schreibstiftweg ds als Quotient beider errechnen, bezeichnet man als *wahren Federmaßstab* bei der betreffenden Spannung: $m = \frac{ds}{dp}$. In praxi muß man sich damit begnügen, den Federmaßstab für kleine, aber endliche Intervalle zu bestimmen und sieht diesen dann als wahren Federmaßstab an: eine 12 kg-Feder untersucht man etwa von Atmosphäre zu Atmosphäre und bezeichnet den Abstand zwischen der 3 at- und der 4 at-Linie als wahren Federmaßstab bei $3^1/_2$ at — was annähernd zutrifft. Eine 2 kg-Feder untersucht man etwa von Viertel zu Viertel Atmosphäre. In Fig. 226 ist der Verlauf des wahren Federmaßstabes,

wie er sich aus dem Eichdiagramm Fig. 225 ergibt, unter „kalt" dargestellt.

Bei der Ermittlung der indizierten Leistung rechnet man häufig einfach mit dem mittleren Federmaßstab. Kommen im Diagramm eines Hochdruckzylinders, Fig. 227, Spannungen von 11 bis hinab zu 1 at vor, so benutzt man zur Auswertung den mittleren Federmaßstab von 1 bis 11 at. Das ist korrekt bei Pumpendiagrammen, die überall die gleiche Breite haben; wenn jedoch Diagramme wie das in Fig. 227 gezeichnete Dampfdiagramm oben schmaler sind als unten, so müßte man die den einzelnen Druckstufen entsprechenden Flächen einzeln ermitteln und könnte für Fig. 227 etwa folgende Rechnung anstellen: Das Diagramm ist durch eine Wagerechte, die nach dem Eichdiagramm Fig. 225 dem Druck 6 at entspricht, in zwei Flächen zerlegt; für den oberen Diagrammteil, von 11 bis 6 at, gilt nach Fig. 225 der Federmaßstab 5,98 mm/at, für den unteren Teil, von 6 bis 1 at, gilt 6,19 mm/at; für die obere Fläche findet sich (mit der früheren Bezeichnung)

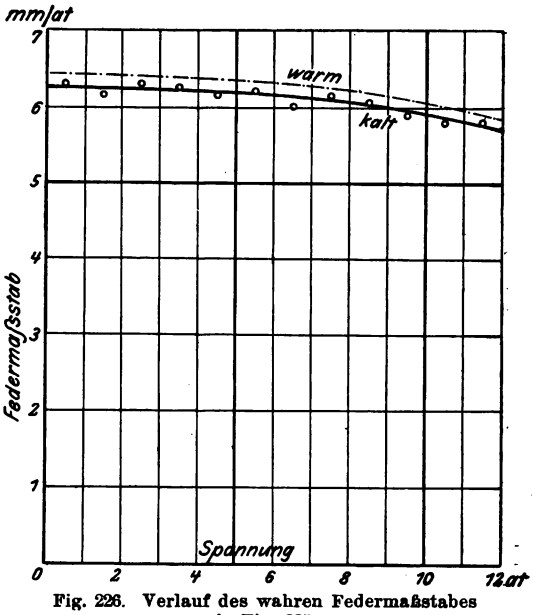


Fig. 226. Verlauf des wahren Federmaßstabes in Fig. 225.

$$J = 807 \text{ qmm}; \quad h_m = \frac{807}{99{,}6} = 8{,}11 \text{ mm}; \quad p_i = \frac{8{,}11}{5{,}98} = 1{,}355 \text{ at};$$

für die untere Fläche ist

$$J = 1682 \text{ qmm}; \quad h_m = \frac{1682}{99{,}6} = 16{,}9 \text{ mm}; \quad p_i = \frac{16{,}9}{6{,}19} = 2{,}73 \text{ at}.$$

Also haben wir die Leistungsermittlung so wie üblich, jedoch unter Zugrundelegung eines wirksamen Überdruckes $p_i = 1{,}355 + 2{,}73 = 4{,}08$ at durchzuführen. Die Auswertung der Gesamtfläche in eins hätte $p_i = 4{,}11$ at ergeben, also um fast 1% zuviel.

Man wird einwenden, die Zerlegung der Gesamtfläche in nur zwei Teile sei nicht ausreichend, da innerhalb der Druckstufen wieder noch

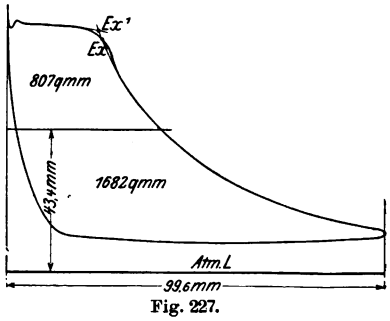


Fig. 227.

ein ungleichmäßiger Federmaßstab und ungleiche Flächeninhalte vorliegen. Darauf ist zu entgegnen, daß die weitere Unterteilung verhältnismäßig kleine Änderungen im Ergebnis liefert, weil die Unterschiede sowohl des Federmaßstabes als auch der Flächen kleiner sind; andererseits wächst mit der weiteren Unterteilung die Arbeit der Auswertung. Aber selbst wenn man die Erzielung größtmöglichster Genauigkeit obenanstellt, so ist noch zu bedenken, daß die Genauigkeit der Planimetrierung abnimmt, wenn man sehr schmale Streifen umfährt. Man mag also statt in zwei vielleicht lieber in drei oder vier Teile einteilen, aber die Einteilung in zehn Teile, entsprechend dem Eichdiagramm, läßt nicht die größte Genauigkeit erwarten; zeigt doch auch das Eichdiagramm für so kleine Unterteilung Unregelmäßigkeiten.

Bei Auswertung von Dauerversuchen mit ihrer oft großen Anzahl von Diagrammen wird man die eben beschriebene Auswertungsart, selbst wenn man sich auf Zweiteilung des Diagramms beschränkt, für zu zeitraubend halten. Man kann *Ungleichmäßigkeiten* des Federmaßstabes dann recht einfach *berücksichtigen*, wenn die verschiedenen Diagramme einer Zylinderseite einander sehr ähnlich bleiben, wie das bei Dauerversuchen meist der Fall ist. Man wertet jedes Diagramm als Ganzes aus, jedoch unter Zugrundelegung eines mittleren Federmaßstabes, der so gebildet ist, daß die Maßstäbe in den einzelnen Höhenlagen entsprechend der Diagrammfläche in der betreffenden Höhenlage zur Geltung kommen. Man würde daher, wieder bei Fig. 225 und 227, folgende Überlegung machen: Die Maßstäbe 5,98 und 6,19 mm/at sollen einen Einfluß proportional den Diagrammflächen 807 und 1682 qmm auf das Ergebnis haben; es ist

5,98 ×	807 =	4820
6,19 ×	1682 =	10410
Summe	2489	15230

der Mittelwert für die Gesamtfläche muß also 15 230 : 2489 = 6,13 mm/at sein. Man findet nun diesen Mittelwert aus einem oder einigen der aufgenommenen Diagramme und berechnet mit dem so gewonnenen Mittelwert sämtliche Diagramme, ohne sie zu unterteilen. Man kann natürlich auch hier das herausgegriffene Diagramm öfter unterteilen als nur einmal; der mittlere Maßstab m_m ist zu finden nach der Regel $m_m = \frac{\sum J \cdot m}{\sum J}$; im Nenner ist als Summe der durch Einzelplanimetrierung erhaltenen Flächen nicht etwa das — vermutlich etwas abweichende — Ergebnis der Gesamtplanimetrierung einzuführen; auch hier bringt weitergehende Unterteilung nicht sicher größere Genauigkeit.

Das beschriebene Verfahren zur Ermittlung eines mittleren Federmaßstabes ist von Eberle angegeben. Eine Zusammenstellung solcher Verfahren findet man Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 1583. Wo man nicht die Arbeit ermitteln, sondern etwa den Verlauf einer Expansionslinie studieren will, da hilft der mittlere Federmaßstab nichts, man muß dann auf Grund des Eichdiagramms das Diagramm auf gleichmäßigen Federmaßstab umzeichnen. Das ist einfach zu machen, man kann sich

z. B. auch des von Schröter-Koob angegebenen und Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 1584 beschriebenen Verfahrens bedienen. Besser ist es immer, eine gut gleichmäßige Feder zu verwenden und dann diese umständlichen Verfahren zu lassen.

Die größten Unregelmäßigkeiten geben schwache Federn. Die 2 at-Federn für normalen Kolben vermeidet man am besten ganz und begnügt sich entweder mit geringer Diagrammhöhe oder verwendet Indikatoren vierfacher Kolbenfläche (§ 83). Namentlich findet man Unterschiede im Federmaßstab über und unter der Atmosphärenlinie.

88. Versetzte Diagramme; Zeit- und Kurbelwegdiagramme. Bisweilen nimmt man Diagramme auf, bei denen die Trommelbewegung nicht von dem Kreuzkopf abgeleitet wird, der zu dem betreffenden Zylinder gehört, sondern zu einer um 90° versetzten Kurbel. Bei Verbundmaschinen leitet man die Trommelbewegung einfach vom anderen Kreuzkopf aus ab. Der Totpunkt liegt dann in der Mitte des Diagramms. Solche *versetzten Diagramme* lassen den Diagrammverlauf in der Nähe

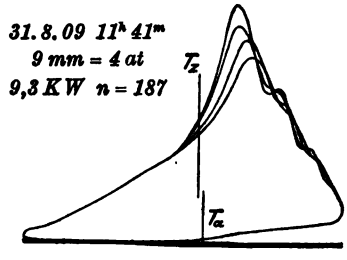


Fig. 228. Versetztes Diagramm.

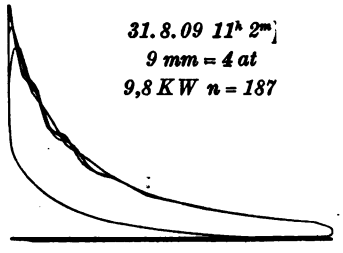


Fig. 229. Kolbenwegdiagramm.

des Totpunktes besser erkennen als das gewöhnliche, das nahe dem Totpunkt stark verkürzt ist, weil die Trommel sich da langsam bewegt.

So ist in Fig. 228 und 229 das gewöhnliche Kolbenwegdiagramm einer Gasmaschine neben ein mit versetzter Kurbel aufgenommenes gezeichnet. Jedes der Diagramme besteht aus einem Bündel von Einzeldiagrammen. Nach Fig. 229 scheint es, als ob die Zündung im Totpunkt einsetze. Fig. 228 zeigt, indem es die Vorgänge in der Gegend des Totpunktes auseinanderzieht, daß die Verbrennung erheblich vor dem Totpunkt merkbar wird — das Überspringen des Zündfunkens muß noch früher erfolgt sein — und daß das Anwachsen des Druckes mit wechselnder Geschwindigkeit erfolgt. — Die Totpunkte sind eingezeichnet; sie liegen wegen der endlichen Schubstangenlänge nicht genau in der Diagrammmitte. Daß beim Hin- und Rückgang verschiedene Lagen gemessen sind, rührt von Ungenauigkeiten her.

Das versetzte Diagramm verzerrt die Verhältnisse und gibt erst mit dem gewöhnlichen Diagramm zusammen ein Bild der gesamten Verhältnisse. Sein Vorzug ist, daß man es ohne weiteres mit dem gewöhnlichen Indikator aufnehmen kann, und daß die verschiedenen Diagramme eines Bündels so übereinander gezeichnet werden, daß man sie

ohne weiteres vergleichen kann; letzteres ist für manche Zwecke ein Vorzug gegenüber den nun zu besprechenden Zeitdiagrammen.

Bei diesen wird nicht der Kolbenweg oder das Volumen, sondern es wird die Zeit als Abszisse aufgetragen; dadurch erreicht man, daß weder die Vorgänge im Totpunkt, noch die in der Hubmitte verkürzt wiedergegeben werden, wie das eine beim gewöhnlichen, das andere beim versetzten Diagramm der Fall ist. Es werden alle Teile des Diagrammes gleichmäßig berücksichtigt. Die endliche Diagrammlänge, die der hin und her gehenden Bewegung des Kolbens entsprach, ist beim *Zeitdiagramm* nicht mehr vorhanden; die Zeit schreitet stetig fort, und so ist das Zeitdiagramm an sich ohne Ende. Man braucht also, um es aufzunehmen, eine endlose Schreibfläche, die man entweder in Form eines langen — nicht endlosen Bandes — oder in Form einer in sich geschlossenen Trommelfläche an dem Schreibstift vorbeiführt. Wird diese Fläche durch einen gleichmäßig umlaufenden Motor bewegt, so erhält man die eigentlichen Zeitdiagramme. Wird sie indessen von der Kurbelwelle der indizierten Maschine aus angetrieben, die nur annähernd gleichförmig umläuft, tatsächlich aber einen gewissen Ungleichförmigkeitsgrad aufweisen wird, so erhält man die den Zeitdiagrammen sehr ähnlichen *Kurbelwegdiagramme*. Nur bei sehr großen Ungleichförmigkeitsgraden, wie sie bei langsam laufenden Pumpen vorkommen, oder auch bei besonders genauen Untersuchungen wird man auf den Unterschied dieser beiden Diagrammarten achten müssen. Sonst aber gilt für beide folgendes:

Zum Aufnehmen von Zeitdiagrammen (wie wir immer kurz sagen wollen) sind besondere Indikatoren oder mit besonderen Einrichtungen versehene gewöhnliche Indikatoren erforderlich. Diese sind insbesondere von Prof. Wagener wie folgt angegeben worden[1]).

Man kann die Trommel des gewöhnlichen Indikators nach Entfernung der zum Aufspannen des Papieres dienenden Klemmfedern, der Hubbegrenzung und der rückführenden Federn in einfach rotierende Bewegung versetzen, durch Antrieb von der Maschinenwelle aus oder von einem besonderen Motor aus mittels endloser Schnur; man kann statt der gewöhnlichen Trommel mit Vorteil eine solche von größerem Durchmesser verwenden, die dem Zweck besonders angepaßt ist. Da der Schreibstift über den ganzen Trommelumfang geht, so kann man das Papier nicht mehr mit Klemmfedern halten; man verwendet ein Papier von solcher Länge, daß es sich beim Herumlegen etwas überlappt, und klebt die Enden mit Stärkekleister (in Tuben käuflich) zusammen; ein auf die Papierrückseite gesetzter Kleisterpunkt klebt das Papier auf der blanken Trommel so fest, daß es nicht gleitet, läßt aber doch, solange er nicht trocken ist, den ganzen Papierring wieder abziehen, den man dann mit der Schere an passender Stelle aufschneidet.

Einen so hergerichteten *Indikator mit umlaufender Trommel* zeigt Fig. 230. Der Indikator selbst ist der gewöhnliche, und zwar ein solcher ohne Zylindereinsatz, für Kolben bis zu 40 mm Durchmesser (Fig. 231).

[1]) Indizieren und Auswerten von Kurbelweg- und Zeitdiagrammen. Berlin 1906. — Neuerungen an Indikatoren, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1365.

Die Trommel hat größeren Durchmesser als gewöhnlich; sie braucht auch nicht so leicht zu sein wie sonst, da sie keine Geschwindigkeitsänderungen erleidet. Auf der Trommel schreibt nicht nur der Schreibstift des Indikators, sondern noch ein *Markenschreibzeug*, dessen Aufgabe es ist, die Totpunkte der Maschine aufzuzeichnen, da dieselben nicht mehr, wie im Kolbenwegdiagramm, ohne weiteres gegeben sind. Ein Glockenelektromagnet zieht einen Anker an und verursacht dadurch einen Sprung in der Linie, die der Schreibstift um die Trommel herum zieht. Die Erregung erfolgt von einem Kontakt aus, den die Maschine in jedem oder in jedem zweiten Totpunkt schließt, unter Verwendung

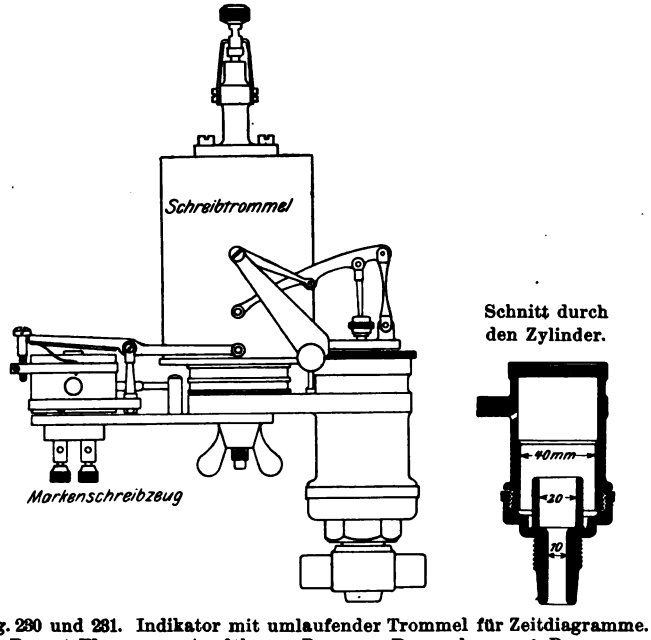


Fig. 280 und 281. Indikator mit umlaufender Trommel für Zeitdiagramme. Bauart Wagener, Ausführung Dreyer, Rosenkranz & Droop.

einer Batterie von Sammlern oder Leclanché-Elementen. — Das Aufzeichnen nur der Totpunkte ist an sich ausreichend; da man die Umlaufzahl der Maschine messen kann, so läßt sich der Zeitmaßstab berechnen. Bequemer ist es aber, auch noch die Zeit aufzuschreiben, um so die Umlaufzahl der Maschine aus dem Diagramm selbst finden zu können. Das zu tun, dient die Federsperrung am Kopf der Trommel. Der obere Griff ist in der Trommel drehbar, er sitzt auf der Achse auf, um die die Trommel herumläuft. Nach Aufbringen der Trommel bringt man nun die an der Trommel befindlichen Blattfedern zum Einfallen in die Kerben des Griffes; dadurch wird die Trommel hochgehalten und kann nicht ganz bis auf den Schnurkranz herabfallen; sobald man aber den gerauhten Griff, während die Trommel läuft, einen Augenblick festhält, löst sich die Sperrung, und die Trommel sinkt herab. Man kann daher

erst die Totpunktmarken zusammen mit dem Druckdiagramm und dann sehr schnell darauf Zeitmarken über den Totpunktmarken aufschreiben, die etwa von einem Halbsekundenpendel erregt werden. Die beiden Markenreihen sehen dann so aus wie die früher in Fig. 67 auf S. 86 dargestellten und ergeben, wie dort besprochen, die Geschwindigkeit, das heißt die minutliche Umlaufzahl der Maschine. — Die umlaufende Trommel der Fig. 230 kann abgezogen werden, um das Papier aufzuziehen, aber auch um sie gegen eine gewöhnliche für Kolbenwegdiagramme zu ersetzen. Der Indikatorzylinder Fig. 231 läßt Kolben von 40, 20 und 10 mm Durchmesser verwenden.

Einen Zeitindikator, der die Diagramme auf ein Band aufschreibt, zeigt Fig. 232 im Bilde. Als Indikator ist ein Kaltfederindikator J von gewöhnlicher Bauart verwendet; einen gleichen fanden wir schon in Fig. 202 abgebildet. Das Papierband läuft von einer Vorratsrolle R_1, die nur wenig durch das Gestänge hindurchschaut, durch ein Walzenpaar W, von denen man nur die vordere und auch diese nur bedeckt mit dem Papierstreifen sieht, auf eine Sammelrolle R_2. Der Antrieb geschieht durch die Schnurscheiben S, die Fest- und Losrolle darstellen; diese sitzen mit der hinteren der Walzen W auf einer Achse, so daß das Band durch die Walzen, zwischen denen es durch einen Federbügel (unter dem Buchstaben R_2) eingeklemmt ist, vorgeschoben wird. Auf der gleichen, unten von der Scheibe S angetriebenen Achse sitzt oben eine Scheibe G, die von der Achse durch eine Gleitkupplung mitgenommen wird und die ihrerseits durch Gummischnur die Rolle R_2 antreibt. Die Übersetzung von G auf R_2 ist so bemessen, daß R_2 das Papier schneller aufwickeln will, als die Walzen W es vorschieben; den Unterschied, der namentlich erheblich ist, wenn Rolle R_2 fast vollgewickelt ist, gleicht die erwähnte Gleitkupplung durch Gleiten aus. — Wenn man die federnden Griffe B_1 und B_2 herumdreht, kann man die Rollen R_1 und R_2 herausnehmen, um ein anderes Papierband einzuziehen. — Gerade unter dem Indikatorschreibstift sieht man noch einen Schreibstift, der einfach einen Strich auf das ablaufende Band schreibt; die Atmosphärenlinie des Diagrammes, die man beim Bandindikator sonst nicht erhält, liegt in einem Abstande über diesem Strich, den man feststellen kann, wenn der Indikatorhahn geschlossen ist.

Auch beim Bandindikator müssen die Totpunkte angezeichnet werden; dazu dient das Markenschreibzeug M, das wieder aus einem Elektromagneten und seinem Anker besteht; letzterer bewegt einen Schreibstift, der unter dem Schreibstift des Indikators seine Marken aufschreibt. Wollte man auch hier noch die Zeit außer den Totpunkten auftragen, so müßte man zwei Markenschreibzeuge verwenden, die indessen kaum unterzubringen wären; deshalb ist ein *Markenschreibzeug mit schwingender Feder* verwendet, das auch für die rotierende Trommel brauchbar, aber dort weniger unentbehrlich ist. Zwischen Anker und Schreibstift ist eine feine Blattfeder eingeschaltet; wenn nun der Anker kräftig angezogen wird, so wird er in Schwingungen geraten, die bald zum Erlöschen kommen; deren Schwingungszeit ist eine Konstante des betreffenden Schreibzeuges; so legt man, wenn man die Er-

regung des Elektromagneten im Totpunkt der Maschine bewirken läßt, nicht nur dessen Lage, sondern auch die augenblickliche Geschwindigkeit des Papierbandes fest und kann aus dem Abstand der Totpunktmarken auf die Umlaufzahl der Maschine schließen.

Der Bandindikator hat vor dem mit umlaufender Trommel das voraus, daß man auf das etwa 45 m lange Papierband sehr viele Diagramme ohne Unterbrechung aufschreiben und so beispielsweise Regel-

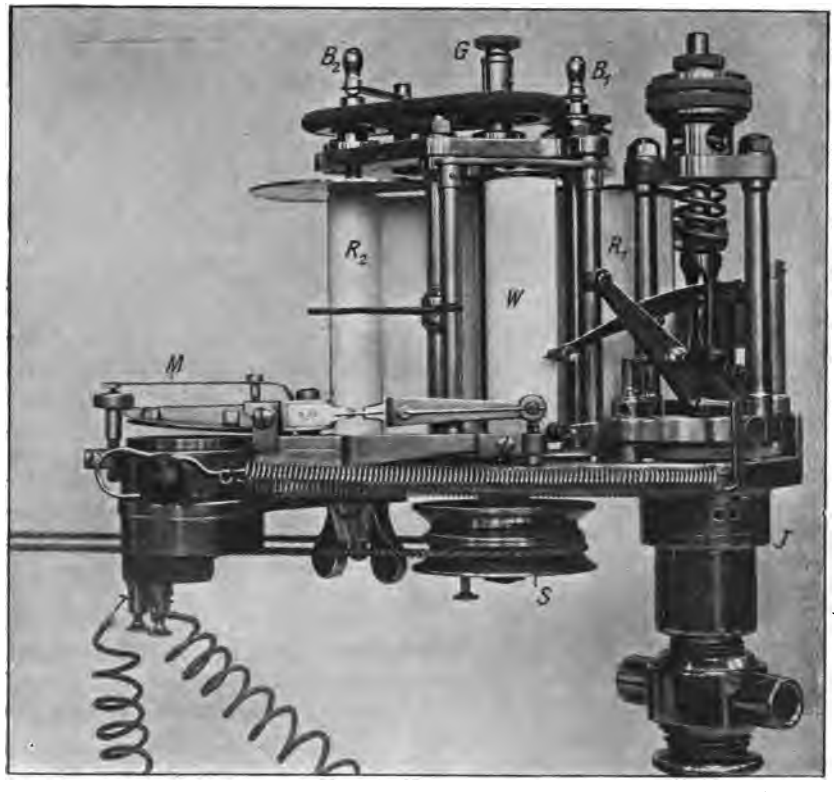


Fig. 232. Bandindikator für Zeitdiagramme.
Bauart Wagener, Ausführung Dreyer, Rosenkranz & Droop.

vorgänge an einer Maschine verfolgen kann, bei denen jedes Diagramm vom vorhergehenden abzuweichen pflegt; bei umlaufender Trommel kann man immer nur wenige Diagramme schreiben, da es sonst schwer zu finden ist, wie die Diagramme am aufgeschnittenen Papierring aneinanderschließen; insbesondere die Totpunktmarken sind dann nicht mehr auseinanderzufinden. Dagegen hat die umlaufende Trommel vor allen Dingen den Vorteil, daß man sie ohne große Unkosten an dem gewöhnlichen Kolbenwegindikator anbringen, und daß man dann wechselweise Zeit- und Kolbenwegdiagramme mit dem gleichen Indikator aufnehmen kann; sie hat auch den Vorteil, daß man die Trommel ruhig

längere Zeit laufen lassen kann, um dann beim Eintritt einer Unregelmäßigkeit an der Maschine schnell das Diagramm zu schreiben; beim Bandindikator würde bei solchem Abwarten Papier verschwendet werden, und im entscheidenden Augenblick wäre das Band vielleicht zu Ende. —

Nun ist aus den Totpunktmarken ohne weiteres auf die Papier- und Maschinengeschwindigkeit zu schließen; zur Ermittlung der Totpunktlage aber ist noch die *Nacheilung des Markenschreibzeuges* zu berücksichtigen. Dessen Hebel wird nämlich nicht zu der Zeit, in der durch den Kontakt der erregende Strom geschlossen wird, bewegt, sondern mit einer gewissen Nacheilung, die davon rührt, daß das An-

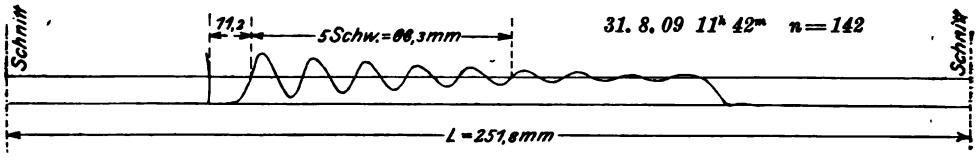


Fig. 233. Ermittlung der Nacheilung des Markenschreibzeuges mit schwingender Feder.

wachsen des Magnetismus bis zu der zur Überwindung der Gegenfeder nötigen Größe eine gewisse Zeit erfordert, und daß weiterhin die Masse des Schreibhebels nur allmählich in Bewegung gerät; bei dem federnden Schreibhebel wird auch die Deformation der Feder in Frage kommen. Die Größe der Nacheilung hängt namentlich von der Einstellung der Gegenfeder, von der Masse des Hebels und von der Spannung der erregenden Stromquelle ab; da letztere veränderlich ist, so muß die Nacheilung auf experimentellem Wege jeweilig bestimmt werden. Diese Bestimmung ist bei der umlaufenden Trommel leicht zu machen, indem man den Kontakt von der Trommel selbst schließen läßt und die Trommel einmal ganz langsam mit der Hand bewegt, einmal mit der später zu benutzenden Geschwindigkeit umlaufen läßt. Man kann ein Papierblatt mit Ausschnitten auf die Trommel spannen; eine Kontaktfeder, die auf dem Papier schleift, schließt den Strom, wenn sie in die Ausschnitte fällt. Besser ist ein auf die Trommel zu setzender, teils isolierender, teils leitender Ring; das Markenschreibzeug schreibt auf einem schmalen, unter dem Ring aufgespannten Papierstreifen. Man erhält beim schwingenden Schreibzeug ein Bild wie in Fig. 233 gezeichnet und ausgewertet. Im langsamen Gang macht das Schreibzeug einen Kreisbogen, im schnellen Gang, das heißt bei 142 Umläufen der Papiertrommel (mit Handtachometer gemessen) beschreibt es die gedämpfte Wellenlinie. Außerdem ließ man einmal bei unerregtem, einmal bei dauernd erregtem Schreibzeug die Trommel umlaufen, um die durchgehenden Parallelen zu erhalten. Nun ist die Länge von 5 Wellen $5\,t_s = 68{,}3$ mm, die der

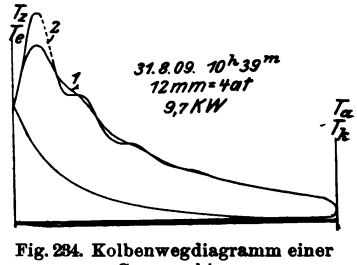


Fig. 234. Kolbenwegdiagramm einer Gasmaschine.

Nacheilung $\varrho = 11{,}2$ mm; also wird die Nacheilung $\frac{\varrho}{t_s} = \frac{5 \cdot 11{,}2}{68{,}3} = 0{,}82$ Bruchteile der Wellenlänge. Außerdem war die Länge des auseinandergeschnittenen Papierbandes 251,8 mm, also die Schwingungszeit der Feder $t_s = \frac{68{,}3 \cdot 60}{5 \cdot 251{,}8 \cdot 142} = 0{,}0229$ sek oder ihre Schwingungszahl $\frac{1}{t_s} = \frac{43{,}6}{\text{sek}}$. Die Nacheilung ist in Bruchteilen der Wellenlänge angegeben, weil offenbar, und wie auch Versuche bestätigen, diese Angabe auch für wechselnde Papiergeschwindigkeiten gültig bleibt: Wellenlänge und Nacheilung nehmen mit zunehmender Papiergeschwindigkeit gleich stark zu. Diese bequeme Beziehung hat man bei nichtschwingendem Schreibzeug nicht; sonst geschieht die Bestimmung der Nacheilung ähnlich. — Wenn, wie in Fig. 232, Indikator- und Markenschreibstift nicht ganz übereinanderstehen, vielleicht weil sie sonst beim Arbeiten zusammenstoßen, dann muß man den Unterschied auch noch berücksichtigen; er ist für alle Papiergeschwindigkeiten der gleiche.

Das *Zeitdiagramm* einer Gasmaschine ist in Fig. 235 gegeben, daneben zeigt Fig. 234 gewöhnliche Kolbenwegdiagramme; die beiden Diagrammpaare sind genau gleichzeitig aufgenommen, es handelt sich also um die gleichen Hübe der Maschine. Das Zeitdiagramm ist mit umlaufender Trommel und mit schwingendem Markenschreibzeug aufgenommen; man erkennt, wie der ganze Linienzug fast dreimal über die Trommel gegangen ist; links setzt sich immer der rechts beendete Zug fort, weil der Papierring aufgeschnitten war. Das gleiche gilt von den Totpunktmarken. — Es waren zunächst die Totpunkte einzutragen; dieselben sind in der Figur mit den Indizes *e*, *k*, *z*, *a* bezeichnet, um anzudeuten, daß bei diesem Totpunkt das Einsaugen, Komprimieren, Zünden und Ausstoßen der Gase beginnt; der Zahlenindex deutet an, ob der Totpunkt zum ersten oder zweiten Arbeitsspiel gehört. Es war das Markenschreibzeug verwendet worden, für welches wir die relative Nacheilung $\varrho/t_s = 0{,}82$ eben ermittelt haben. 5 Schwingungen sind in

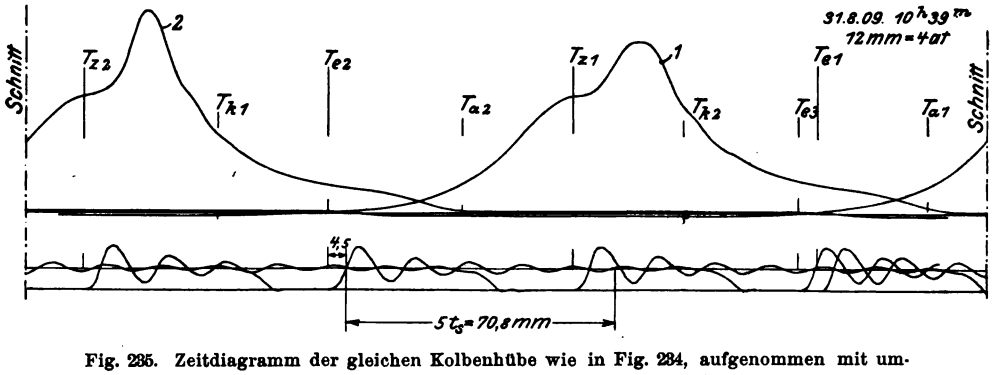


Fig. 235. Zeitdiagramm der gleichen Kolbenhübe wie in Fig. 234, aufgenommen mit umlaufender Trommel und schwingendem Markenschreibzeug.

unserem Diagramm 5 t_s = 70,8 mm; daher die Nacheilung ϱ = 11,6 mm. Durch Betätigen der beiden Schreibstifte bei stillstehender Trommel war eine Ordinatendifferenz von 7,1 mm entgegen der Nacheilung ermittelt; also liegt der Totpunkt immer 11,6 — 7,1 = 4,5 mm vor dem Schnittpunkt der ersten Schwingung mit der Schwingungsmittellinie. So sind die Totpunkte T_{e_1}, T_{z_1}, T_{e_2}, T_{z_2}, T_{e_3} eingetragen; waltet irgendein Zweifel ob, um welchen Totpunkt es sich in einem bestimmten Fall handelte, so konnte man entscheiden an Hand der Tatsache, daß die Totpunkte in der Reihenfolge, wie sie aufgezählt sind, immer gleichen Abstand (über das Papierende hinweg gemessen) haben müssen; in der Tat waren diese Abstände in unserem Diagramm 187,6; 187,5; 187,3; 187,3 mm, also sehr befriedigend gleich. — Da wir soeben die Schwingungszeit unserer Schreibzeugfeder zu 0,0229 sek bestimmt hatten, so ist nun auch die Umlaufzahl der Maschine zu berechnen; es sind

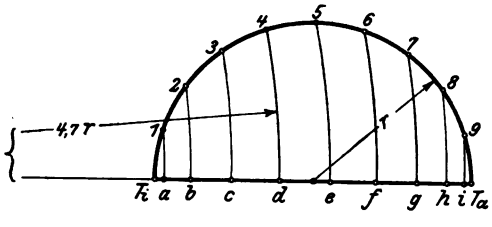


Fig. 236.
Beziehung zwischen Kolbenweg und Kurbelweg.

$$5\ \text{Schw.} = 70{,}8\ \text{mm},$$

$$1\ \text{Uml.} = 187{,}4\,\text{mm} = \frac{187{,}4 \cdot 5}{70{,}8} = 13{,}23\ \text{Schw.} = 13{,}23 \cdot 0{,}0229 = 0{,}303\ \text{sek}.$$

$$1\ \text{min} = 60\ \text{sek} = \frac{60}{0{,}303} = 197{,}7\ \text{Uml}.$$

Über die Form der Diagramme sei nur erwähnt, daß in der Gegend der Zündung ein fast wagerechter Verlauf eintritt, der im Kolbenwegdiagramm nicht vorhanden ist; man wird seine Ursache darin erkennen, daß in der Nähe des Totpunktes der Kolben fast stillsteht, das Papier aber weiterläuft. Der Druckanstieg infolge der Zündung beginnt erst kurz nach dem Totpunkt, im Gegensatz zu den Diagrammen Fig. 228, im letzteren Fall war also die Zündung früher gestellt. Das hätte man durch Vergleich der Kolbenwegdiagramme Fig. 229 und 237 weniger gut erkennen können. —

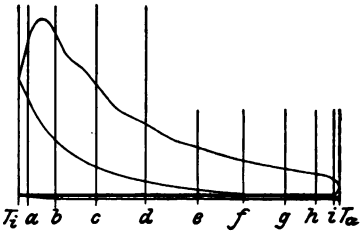


Fig. 237. Kolbenwegdiagramm.

Die unter einem Zeitdiagramm liegende Fläche kann nicht ohne weiteres zur Leistungsermittlung verwendet werden. Die Diagrammfläche stellt nur dann die Arbeit dar, wenn die Kolbenkräfte als Funktion der Kolbenwege aufgetragen sind. Man kann deshalb in die Lage kommen, Zeitdiagramme *in Kolbenwegdiagramme umzuzeichnen*, um die

Leistung zu finden, und hat dann den Vorteil, die von der Schnurdehnung herrührenden Fehler des Kolbenwegdiagrammes zu vermeiden.

In Fig. 236 stellt der Halbkreis die obere Hälfte des Kurbelkreises dar, die von der Kurbel mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchlaufen wird; die Teilpunkte *1* bis *9*, die den Umfang vom inneren Totpunkt T_i bis zum äußeren T_a in 10 gleiche Teile teilen, begrenzen also einander gleiche Zeitabschnitte. Während die Kurbel den Halbkreis durchläuft, bewegt sich der Kolben auf einer Geraden von der Länge gleich dem Abstand $T_i T_a$; zur Kurbelstellung *4* gehört zwischen T_i und T_a derjenige Punkt *d*, der durch einen Kreisbogen bestimmt ist mit der Pleuelstange als Radius; da es sich bei unseren Zeitdiagrammen um eine Gasmaschine von 470 mm Hub, also $R = 235$ mm bei 1100 mm Pleuelstangenlänge handelte, so muß der Radius der projizierenden Kreisbögen das $\frac{1100}{235} = 4{,}7$fache des Kurbelkreisradius r sein. Indem man mit diesem Radius jeden der Punkte *1* bis *9* auf den Durchmesser herabprojiziert, erhält man die Punkte *a* bis *i*, die die in gleichen Zeiträumen vom Kolben durchmessenen Strecken begrenzen.

Daraus ergibt sich der in Fig. 237 und 238 gezogene *Vergleich eines Zeit- mit einem Kolbenwegdiagramm*; in ersterem finden sich die Punkte *1* bis *9*, in letzterem die Punkte *a* bis *i* wieder. Allerdings ist das Kurbelwegdiagramm nicht aus dem anderen hergeleitet, sondern es sind zwei gleichzeitig aufgenommene Diagramme (die Diagramme *1* der Fig. 233 und 234) gezeichnet. Die bei *a* und *1*, bei *b* und *2*... indizierten Drucke sollten nun miteinander übereinstimmen; das trifft auch bei der Kompressionslinie recht gut und bei der Expansionslinie von *c* — *3* ab zu. Der Höchstdruck indessen scheint bei dem Zeitdiagramm später einzutreten und kleiner zu sein; die dem Kolbenwegdiagramm entsprechende Kurve ist zum Vergleich einpunktiert. Es handelt sich um genau die gleichen Arbeitstakte; so werden wir die Unterschiede auf Ungleichheiten der beiden verwendeten äußerlich gleichartigen In-

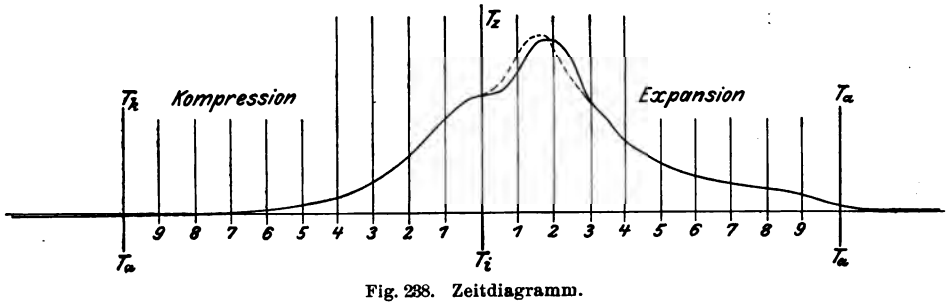


Fig. 238. Zeitdiagramm.

dikatoren schieben müssen; beim Zeitindikator scheint die Dämpfung größer gewesen zu sein. Es sollte das besonders hervorgehoben werden, um zu belegen, wie vorsichtig man beim Entnehmen spitzer Höchstwerte aus einem Indikatordiagramm (und nicht nur bei diesem) sein

muß, solange man nicht die Massenwirkungen nach § 7 berücksichtigt. Vermutlich gibt keiner der beiden Höchstwerte den Druck richtig an.

Das Umgekehrte, nämlich Kolbenwegdiagramme in Zeitdiagramme umzuzeichnen, ist nur mangelhaft möglich, weil die Vorgänge in der Nähe des Totpunktes nicht deutlich genug im Kolbenwegdiagramm zu erkennen sind.

89. Maßstab der Diagramme. Die folgenden Überlegungen sind dann nützlich, wenn es sich darum handelt, Kolbenwegdiagramme auf anderen Maßstab umzuzeichnen, etwa die Diagramme der Zylinder einer Mehrfachexpansionsmaschine auf einen gemeinsamen Maßstab zu bringen, wie das beim Rankinisieren nötig ist.

Die gewöhnlichen Indikatordiagramme verzeichnen die im Zylinder herrschenden Spannungen als Ordinaten und die vom Kolben zurückgelegten Wege als Abszissen. So pflegt man zu sagen. Korrekter ist es, den Zusammenhang so auszudrücken, daß man beide Größen auf den Kolben bezieht und sagt: man habe die auf den Kolben wirkenden Kräfte als abhängig vom Kolbenweg dargestellt: so erhält man, wenn man als Einheiten Kilogramm beziehungsweise Meter wählt, als Fläche die Arbeit in Meterkilogrammen. Man kann auch beide Größen auf den Zylinderinhalt beziehen und sagen: man habe die im Zylinderraum herrschenden Spannungen als abhängig von dem jederzeit verfügbaren Zylindervolumen dargestellt: wählt man als Einheiten das Kubikmeter beziehungsweise das Kilogramm pro Quadratmeter, so erhält man als Fläche (S. 3) wieder die Arbeit in Meterkilogramm.

Diese beiden Darstellungsweisen sind ohne weiteres ineinander überzuführen, indem man die Einheit der Abszisse beziehungsweise der Ordinate mit der wirksamen Kolbenfläche vervielfacht oder teilt. Sei etwa ein Diagramm aufgenommen an einer Maschine mit 200 mm Zylinderdurchmesser entsprechend 314,2 qcm wirksamer Kolbenfläche und 400 mm Hub; die Diagrammlänge sei 90 mm und die verwendete Feder habe den Maßstab 8 mm/at. Dann sind die Maßstäbe, bezogen auf den Kolben:

Abszissen: $90\text{ mm} = 0{,}4\text{ m}$ Kolbenweg,

$$1\text{ cm Abszisse} = \frac{0{,}4}{9} = 0{,}0444\text{ m Kolbenweg};$$

Ordinaten: $8\text{ mm} = 314{,}2\text{ kg}$ Kolbenkraft,

$$1\text{ cm Ordinate} = \frac{314{,}2}{0{,}8} = 393\text{ kg Kolbenkraft},$$

daher die Flächen

$$1\text{ qcm Fläche} = 0{,}0444\text{ m} \times 393\text{ kg} = 17{,}44\text{ mkg Arbeit pro Hub.}$$

Die gleiche Rechnung kann man durchführen bezogen auf den Zylinderinhalt:

Abszissen: $90\text{ mm} = 314{,}2 \cdot 40 = 12\,568\text{ ccm} = 0{,}01257\text{ cbm},$

$$1\text{ cm Abszisse} = \frac{0{,}01257}{9} = 0{,}001397\text{ cbm } (= 1{,}40\text{ ltr}),$$

Ordinaten: $8\text{ mm} = 1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = 10\,000\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}}$,

$$1\text{ cm Ordinate} = \frac{10\,000}{0{,}8} = 12\,500\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}}\ (= 1{,}25\text{ at});$$

daher die Flächen:

$$1\text{ qcm Fläche} = 0{,}001\,397\text{ cbm} \times 12\,500\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}} = 17{,}46\text{ mkg Arbeit p. Hub.}$$

In beiden Fällen ergibt sich natürlich — bis auf die kleine Unstimmigkeit durch Abrundung — der gleiche Wert der Flächeneinheit. Im einen Fall betrachtet man die von dem Zylinderinhalt, Dampf oder Gas, hergegebene Arbeit, im anderen Fall die vom Kolben aufgenommene (bei Kraftmaschinen) Arbeit, und beide müssen identisch sein.

Einige bisweilen übliche Benennungen der Diagrammarten werden im Anschluß hieran verständlich sein; man nennt das Kolbenwegdiagramm wohl Druck-Volumen-Diagramm — $p\,v$-Diagramm —, das Zeitdiagramm dann Druck-Zeit-Diagramm — $p\,t$-Diagramm. Dürfte man bei sehr ungleichförmiger Bewegung der Maschinenkurbel den Kurbelweg S nicht proportional der Zeit setzen, so hätte man noch das $p\,S$-Diagramm.

90. Fehler der Schreibstiftbewegung. Die Annahme, das Indikatordiagramm gebe die im Zylinder der Maschine herrschenden Spannungen abhängig von dem vom Maschinenkolben zurückgelegten Wege, trifft bei genauerer Betrachtung nur näherungsweise zu. Weder entspricht die Höhenlage des Schreibstiftes zu allen Zeiten und genau der Sollstellung, die der Spannung im Zylinderinnern entspräche, noch ist die Trommelbewegung ganz der Kolbenbewegung proportional, auch wenn wir eine genau proportionale Feder verwenden und die Schnurführung korrekt anordnen.

Was zunächst die Schreibstiftbewegung anlangt, so ist der Indikator seinem Wesen nach ein aufzeichnendes Manometer; es gilt für ihn, was wir in § 7 bis 9 über das Verhalten von Instrumenten im allgemeinen und von Manometern im besonderen gesagt und an Fig. 3 bis 5 erläutert haben. Wo immer die Kurve, welche die Abhängigkeit der Spannung p von der Zeit t zur Darstellung bringt, eine plötzliche Richtungsänderung erleidet — was im allgemeinen dann auch einer Richtungsänderung im Kolbenwegdiagramm entspricht — da macht das mit Masse begabte Schreibzeug die ihm auferlegte Geschwindigkeitsänderung nicht sofort mit; es wird dann, indem die von unten auf den Kolben wirkende Spannung nicht mehr der Federkraft entspricht, eine Kraft frei, die zur Beschleunigung dient; die dieser freien Kraft entsprechende Arbeit aber — oder die dem Schreibzeug erteilte Geschwindigkeitsenergie — bewirkt Schwingungen des Schreibstiftes um seine jeweilige Sollstellung, die allmählich durch Dämpfung oder Reibung verschwinden. Diese *Federschwingungen* stören das Diagramm, insofern die Ordinaten nicht mehr genau Spannungen darstellen. Auf die Diagrammfläche haben sie, solange es sich um mäßige Umlaufzahlen bei normalen Ver-

hältnissen handelt, nicht allzu großen Einfluß und können oft unbeachtet bleiben; Ermittlungen über den Verlauf einer Expansionslinie und alle feineren Messungen werden indessen durch die Federschwingungen unmöglich gemacht. So hätte es bei der Ermittelung der im Zylinder einer Dampfmaschine arbeitenden Dampfmenge aus dem Indikatordiagramm, wie wir sie auf S. 129, Fig. 98, besprachen, wenig ausgemacht, wenn wir statt des Punktes Ex einen anderen Punkt der schwach eingezeichneten Ausgleichlinie verwendet hätten; ganz falsche Ergebnisse aber hätten diejenigen Punkte des Diagramms gegeben, die gerade dem Maximum oder Minimum einer Schwingung entsprachen. In Fig. 227, S. 277, hätte die Tatsache, daß nur eine leicht zu übersehende Schwingung auftritt, dahin führen können, nicht Ex oder Ex^1 als Expansionspunkt anzusehen, sondern ihn weiter nach rechts zu verlegen.

Man kann nun entweder die Schwingungen durch geeignete Maßnahmen beim Indizieren auf ein erträgliches Maß zurückführen, oder man

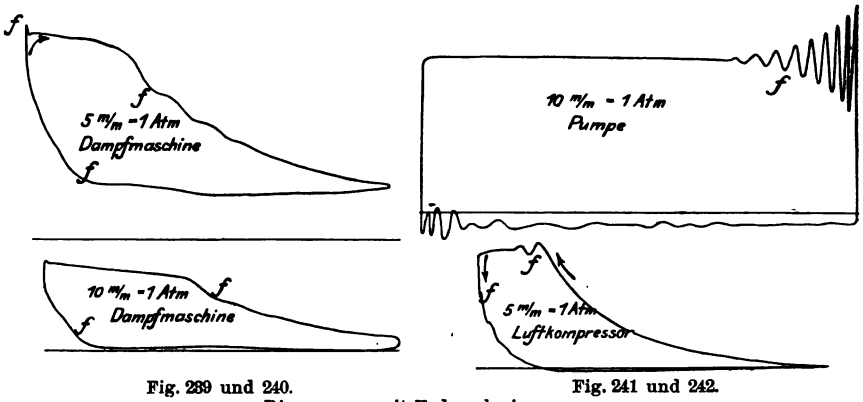


Fig. 239 und 240. Fig. 241 und 242.
Diagramme mit Federschwingungen.

muß sie bestehen lassen und später schätzungsweise oder durch ein rechnerisch-graphisches Verfahren aus dem Diagramm eliminieren. Letzteres ist nur bei Zeitdiagrammen möglich und des Zeitaufwandes wegen selten durchführbar; wir kommen in § 93 auf das Verfahren zu sprechen. Jetzt handelt es sich darum, wie man die Federschwingungen als solche erkennt und in mäßigen Grenzen hält.

In Fig. 239 bis 242 sind einige Diagramme mit mehr oder weniger ausgeprägten Federschwingungen dargestellt, die überall durch ein daneben gesetztes *f* angedeutet sind; man wird sehen, daß sie in der Tat überall nach einem Richtungswechsel auftreten. Die Auswertung der Diagrammfläche mit einem Planimeter könnte man an diesen Diagrammen ruhig vornehmen, an dem Pumpendiagramm würde man die Schwingungen unbeachtet lassen und in halber Höhe durch sie hindurchfahren. In einem Diagramm nach Fig. 243 pflegt man auch wohl die beiden Kurven *c d* und *c e* so zu ziehen, daß sie überall die durch Federschwingungen erzeugten Wellen berühren; die wahre Spannungskurve war dann die Kurve *c b*, die Mittelkurve aus *c d* und *c e*, und zwar in dem Sinne die

Mittelkurve, daß der gleicher Ordinate die mittlere Abszisse zugeordnet ist, nicht aber so, daß der winkelrecht gemessene Abstand beiderseits gleich ist. Oder aber man zieht, von *c* beginnend, freihändig mit meist ausreichender Genauigkeit eine Kurve *c b* von möglichst stetiger Krümmung durch die Federschwingungen so hindurch, daß die zu beiden Seiten der neugezogenen Kurve liegenden Flächenteilchen gleichmäßig größer und größer werden. Die stetige Krümmung erkennt man, wenn man sich dicht auf die Papierebene beugt und längs der Kurve blickt. Der Punkt *b* wäre als Expansionspunkt des Diagramms anzusprechen. Die Anwendung der Simpsonschen Regel wäre ohne solches Ausgleichen ganz unzulässig: man könnte lauter zu große Ordinaten fassen. Da übrigens im allgemeinen die kleine Fläche *1* größer als *2*, *3* größer als *4* ist, so sieht man auch sofort, daß — in diesem Fall — die Schwingungen die Diagrammfläche zu groß erscheinen lassen. —

Bei dem Gasmaschinendiagramm Fig. 229 würde die Auswertung bereits auf praktische Schwierigkeiten stoßen, weil man die einzelnen Diagramme kaum voneinander unterscheiden kann. Wenn diese Schwierigkeiten auftreten und gar größer werden, so wird man die Indikatorschwingungen vermindern durch Anwendung eines Indikators mit geringer bewegter Masse, durch Anwendung eines größeren Kolbens unter entsprechender Verstärkung der Meßfeder, so daß die Diagrammhöhe erhalten bleibt, oder endlich durch Anwendung einer stärkeren Feder, vielleicht auch unter Anwendung eines kleineren Kolbens, um die Diagrammhöhe zu verkleinern. Alle diese Maßnahmen zielen darauf hin, die Eigenschwingungszahl des Schreibzeuges zu vergrößern — worauf es nach § 9 ankommt.

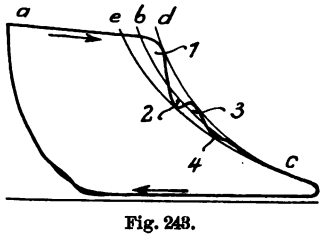


Fig. 248.

Die Verkleinerung der Diagrammhöhe ist das bequemste und zugleich wirksamste Mittel. Gegen dasselbe ist einzuwenden, daß man die kleinere Diagrammfläche nicht mit gleicher Genauigkeit planimetrieren kann wie eine größere; wenn man die Verkleinerung der Diagrammhöhe durch Anwendung eines kleineren Kolbens erreichen will, so ist zu bedenken, daß hierbei die Reibung unverändert bleibt, die verstellende Kraft aber vermindert wird; der Einfluß der Reibung wird also größer. Man wird also zur Anwendung eines kleineren Kolbens nur greifen, wenn man stärkere Federn nicht hat. — Die Anwendung eines größeren Kolbens unter gleichzeitiger Verstärkung der Feder verringert im allgemeinen die Eigenschwingungszahl des Schreibzeuges, weil der größere Kolben die bewegte Masse nur unerheblich zu vergrößern pflegt. Innerhalb der Grenzen, wo man es tun kann, ist dies das beste Mittel zur Verminderung der Schwingungen, weil der Einfluß der Reibung vermindert wird infolge der größeren verstellenden Kraft; so sollte man Gebläse und Niederdruckzylinder von Dampfmaschinen möglichst nur mit Kolben von 40 mm Durchmesser indizieren statt mit 20 mm-Kolben und schwacher Feder. — Das dritte Mittel zur Ver-

minderung der Federschwingungen ist die Anwendung von Indikatoren, die besonders für Verwendung bei hohen Umlaufzahlen und bei Explosionsmotoren — die wegen der plötzlich auftretenden Drucksteigerung schwierige Verhältnisse bieten — gebaut sind; sie haben besonders geringe bewegte Masse bei normalem Kolbendurchmesser (Fig. 215 u. 253). Es ist naheliegend, daß sie ihrer leichteren Bauart wegen empfindlicher in der Behandlung sind.

Beim *Indizieren flüssiger Medien*, so bei Pumpen, führt die Anwendung größerer Kolben meist zu keiner Verminderung, sondern zu einer Verstärkung der Federschwingungen aus folgendem Grunde. Um die Bewegungen des Indikatorkolbens zu ermöglichen, muß die dem freigelegten oder verdrängten Raum entsprechende Stoffmenge, durch den Indikatorstutzen hindurch, abwechselnd in der Richtung vom und zum Indikator gehen. Ihre Masse kommt also in jedem Fall zur Masse des Schreibzeuges hinzu; bei Gasen und Dämpfen ist sie unbedeutend, bei Flüssigkeiten aber nicht; eine Vergrößerung des Kolbens hat nun eine Vergrößerung dieser zusätzlichen Masse zur Folge. Und noch mehr: diese Masse ist nicht nur einfach in Rechnung zu setzen wie die Kolbenmasse; wenn der Indikatorstutzen 10 mm Bohrung hat und der Kolben 20 mm Durchmesser, so wird das Wasser im Indikatorstutzen die vierfache Kolbengeschwindigkeit annehmen, also das 16fache an Energie aufnehmen müssen wie die gleiche Kolbenmasse; allgemein: die im Indikatorstutzen befindliche Masse ist nicht einfach, sondern so vielfach zur Indikatormasse hinzuzuzählen, wie die vierte Potenz des Durchmesserverhältnisses besagt. Daher die starken Federschwingungen im Pumpendiagramm Fig. 241, obwohl dasselbe bei nur 60 Uml/min aufgenommen ist, und obwohl ein Zeitdiagramm zeigen würde, daß die Druckänderungen keineswegs sehr plötzlich verlaufen. Bei Pumpen wird eine Verminderung der Federschwingungen hauptsächlich durch Erweiterung des Indikatorstutzens und der unteren Indikatorbohrung zu erreichen sein, nötigenfalls auch — auf Kosten der Reibungsverhältnisse — durch Verkleinerung des Indikatorkolbens.

Die Schwingungen lassen sich natürlich auch durch Dämpfung beseitigen, sei es durch Vergrößerung der molekularen Dämpfung, sei es durch Vergrößerung der Reibung. Wir wissen aus § 9, daß Instrumente, die den Schwankungen folgen sollen, nicht gedämpft sein dürfen, insbesondere nicht durch Reibung. Es ist ja auch klar: eine starke Dämpfung verhindert zwar die Schwingungen, aber läßt auch die Schreibstiftbewegung nachhinken. Immerhin ist eine mäßige molekulare Dämpfung, wie sie die Diagramme Fig. 239 bis 242 zeigen, ganz angenehm und auf die Angabe von geringem Einfluß, übrigens ja auch unvermeidlich. Unbedingt schädlich ist aber die Reibung. Wie sehr allein die Reibung des Schreibstiftes auf dem Papier die Ergebnisse beeinflußt, namentlich bei Verwendung kleiner Kolben und schwacher Federn, das zeigt Fig. 244 bis 247: jedes der Diagramme ist unmittelbar nacheinander zweimal geschrieben, einmal wurde der Schreibstift stark, einmal schwach angedrückt; es ergeben sich teilweise unerwartete Unterschiede.

Die Schwingungen freilich sind fortgefallen. Deshalb kann man geradezu den Satz aufstellen, einige Federschwingungen sind als Zeichen eines guten Zustandes des Indikators anzusehen und unbedingt zu verlangen; seien sie auch nur so schwach wie in Fig. 227, wo nur das geübte Auge sie erkennt.

Außer den Massenschwingungen, die sich, wie schon erwähnt, im Notfall rechnerisch ausmerzen lassen, sind an anderen Ursachen für die Abweichung der Schreibstiftangabe von der Spannung im Maschinenzylinder die folgenden zu nennen. Wir sahen soeben, wie verschieden Diagramme ausfallen, wenn man den Schreibstift verschieden stark andrückt; ähnliches wird die Kolbenreibung bewirken können. Daher die Regel, daß der Kolben lieber etwas leicht gehen und ausblasen, als sich klemmen sollte. — Die Bohrung des Indikatorstutzens bewirkt — abgesehen von den schon besprochenen, nur von der Weite abhängigen Massenwirkungen — eine Dämpfung, hervorgerufen durch die Widerstände der Zuleitung; die Druckschwankungen treten nicht in voller Größe in den Indikatorzylinder ein. Deshalb sollen die Zuleitungen

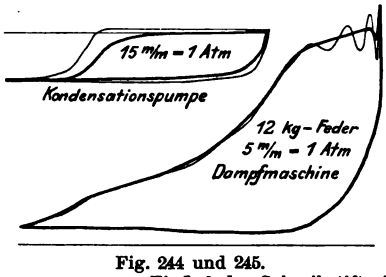


Fig. 244 und 245.

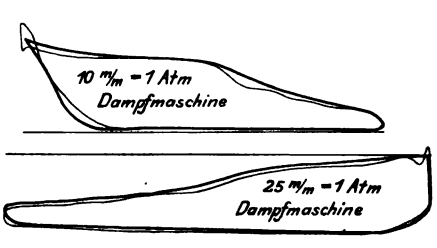


Fig. 246 und 247.

Einfluß der Schreibstiftreibung auf das Indikatordiagramm.

nicht zu eng — wie schon der Massenwirkungen wegen, — aber auch nicht zu lang sein; Knicke in ihnen sind zu vermeiden. Ungünstige Verhältnisse ergeben sich immer, wenn beide Zylinderenden mit einem Indikator indiziert werden sollen — besonders bei höheren Umlaufzahlen. — Außerdem können natürlich durch toten Gang in den Gelenken und Verbiegung des Gestänges Fehler in die Schreibstiftbewegung kommen, die ganz unkontrollierbar sind und durch sorgsame Instandhaltung des Indikators in erträglichen Grenzen gehalten werden müssen. Man überzeuge sich z. B. gelegentlich von der ordnungsmäßigen Form des Schreibzeuggetriebes, indem man eine Atmosphärenlinie bei geschlossenem Indikatorhahn, und eine dazu normale stillstehende Trommel schreibt; beide Linien müssen senkrecht aufeinanderstehen und gerade sein; ein Fehler kann aber auch daher kommen, daß Trommel- und Zylinderachse nicht miteinander parallel sind. —

Im vorstehenden sind die wichtigsten formellen Fehler besprochen, die das Diagramm durch Fehler des Indikators zeigen kann. Die sachlichen Fehler eines korrekt aufgenommenen Diagrammes, die Folgerungen für die Einsteuerung und für die Wirtschaftlichkeit der Maschine werden in den „Maschinenuntersuchungen" unter den verschiedenen Maschinenarten besprochen.

91. Störung des Maschinenganges durch den Indikator. Bei kleinen Maschinen und bei solchen, deren schädlicher Raum sehr klein ist (Kompressoren, Corlißdampfmaschinen) wird der Maschinengang durch den Anbau des Indikators wesentlich geändert. Die Diagramme geben dann nicht praktische Betriebsverhältnisse wieder, und man muß in allen Folgerungen vorsichtig sein.

Der Maschinengang ändert sich zunächst dadurch, daß der Raum unter dem Indikatorkolben zum schädlichen Raum kommt; eine Maschine mit sonst 1% schädlichem Raum hat nun etwa $1^1/_4$%. Das Diagramm stellt daher, wenn auch nicht genau die Betriebsverhältnisse der untersuchten Maschine, so doch wenigstens mögliche Verhältnisse dar. Außerdem aber gibt der sich bewegende Indikatorkolben durch seine Bewegung zu verschiedenen Zeiten mehr oder weniger Raum frei: dieser Raum muß mit dem arbeitenden Medium, mit Wasser bei einer Pumpe, angefüllt werden. Daher wird gewissermaßen der schädliche Raum veränderlich: er ist abhängig von der Spannung im Zylinder. Das sind Verhältnisse, die sonst praktisch unmöglich sind; höchstens mit dem Atmen eines Pumpenkörpers läßt die Erscheinung sich vergleichen.

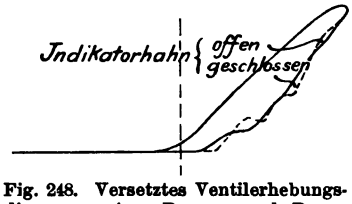


Fig. 248. Versetztes Ventilerhebungsdiagramm einer Pumpe, nach Berg.

Wie sehr die Betriebsverhältnisse einer Pumpe durch den Indikator geändert werden können, zeigen die versetzten Ventilerhebungsdiagramme Fig. 248, deren eines bei offenem, deren anderes bei geschlossenem Indikatorhahn aufgenommen ist. Bei offenem Indikatorhahn hebt sich das Ventil später vom Sitz, weil das Wasser erst den vom Indikatorkolben freigegebenen Raum ausfüllen muß; der Pumpengang wird also durch den Indikator verschlechtert. Auch der volumetrische Wirkungsgrad wird verschlechtert.

92. Fehler der Trommelbewegung. Die Bewegung der Papiertrommel kann — abgesehen von etwa vorhandenen geometrischen Unrichtigkeiten im Antrieb — fehlerhaft werden durch wechselnde *Schnurdehnung*. Bei der Beurteilung der Verhältnisse ist zu beachten, daß wechselnde Schnurdehnung, auch wenn sie Änderungen der Diagrammlänge zur Folge hat, nicht notwendig Fehler ins Diagramm bringt; nur soweit die Dehnungen nicht dem Hube proportional sind, entstehen Fehler nach Maßgabe der Abweichungen von der Proportionalität.

Ursache zu wechselnder Schnurdehnung geben die im Hin- und Hergehen wechselnde Spannung der Trommelfeder und andererseits die Massenwirkungen der Trommel; erstere bewirken eine Verkürzung, letztere eine Verlängerung des Diagrammes; erstere sind unabhängig von der Umlaufzahl der Maschine, letztere nehmen mit der Umlaufzahl zu. Davon, daß die Schnurdehnungen merkliche Beträge annehmen können, überzeugt man sich durch die Beobachtung, daß im langsamen Gang das Diagramm kürzer ist, als es nach dem Übersetzungs-

verhältnis des Hubminderers sein sollte; insbesondere ist, wo zwei Indikatoren hintereinander geschaltet sind, der Hub der zweiten Trommel um die Dehnung der zwischenliegenden Schnur kürzer als der der ersten. Je schneller aber die Maschine läuft, desto länger wird das Diagramm; es kann dabei die aus dem Übersetzungsverhältnis folgende theoretische Länge erreichen und übersteigen. Es handelt sich bei allem diesen um Längenunterschiede von 1 bis 5 mm.

Maßgebend sind, wie erwähnt, nur die Abweichungen von der Proportionalität; hierüber ist nun folgendes zu sagen. Die durch die wechselnde Federspannung hervorgerufenen Dehnungen werden dann keine Fehler ins Diagramm bringen, wenn die Federspannungen dem jeweiligen Trommelhube proportional sind und wenn die Schnur Proportionalität zwischen Dehnung und Spannung aufweist, also dem Hookeschen Gesetz folgt. Die Massenwirkungen würden dann keine Fehler ins Diagramm bringen, wenn die Bewegung der Trommel von der Zeit nach einer reinen Sinusfunktion abhängig verliefe. Es seien nämlich x die Ausschläge des Kreuzkopfes, y die der Trommel, im Maßstab der erstere im Übersetzungsverhältnis des Hubminderers reduziert, und beide von der Stellung in Diagrammitte aus gerechnet, das positive Zeichen für die Richtung wachsender Spannung der Trommelfeder verwendet; es sei m die reduzierte Masse der Trommel, P_1 die Zunahme der Federspannung für $y = 1$ und P_0 die Vorspannung der Feder in der Mittelstellung der Trommel, alle drei bezogen auf den Abstand der Schnurachse von der Trommelachse, und es sei α die Schnurdehnung für 1 kg Belastung, t die Zeit; dann ist

$$\text{die Federspannung} \quad P_0 + P_1 y,$$

$$\text{die Schnurspannung} \quad P_0 + P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2};$$

$$\text{die Schnurdehnung} \quad \alpha\left(P_0 + P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right).$$

Nun wird der Trommelausschlag von der Mitte aus gleich dem des Kreuzkopfes vermindert um die Schnurdehnung

$$y = x - \alpha\left(P_0 + P_1 y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Nur wenn wir, unter l die Diagrammlänge und unter c eine Konstante verstanden, $y = \frac{l}{2} \cdot \sin ct$, also $\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{l}{2} \cdot c^2 \cdot \sin ct = -c^2 y$ setzen können, ergibt sich in

$$y = x - \alpha\,(P_0 + P_1 y + mc^2 y) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

eine lineare Beziehung zwischen den Bewegungen der Trommel und des Kreuzkopfes.

Diese Beziehung wird gestört, wenn die obengenannten Voraussetzungen nicht zutreffen; unvermeidlich sind die Einflüsse endlicher Schubstangenlänge, die zu dem von der Massenwirkung herrührenden

letzten Glied ein weiteres hinzufügen, und die insbesondere dann Störungen in die Proportionalität bringt, wenn mit wachsender Umlaufzahl die Massenkräfte zunehmen. Da c mit wachsender Umlaufzahl zunimmt, so kann es überdies dahin kommen, daß für negative Werte von y der Klammerwert negativ wird: in der Gegend des Totpunktes schwächerer Federspannung tritt dann Schlaffwerden der Schnur ein, die Trommel schleudert. Man muß deshalb bei höheren Umlaufzahlen die Vorspannung P_0 der Feder vergrößern, jedenfalls bis das Schleudern verschwindet, besser noch darüber hinaus, damit das letzte Glied in seinem Einfluß zurücktritt, der, wie erwähnt, bei endlicher Schubstangenlänge ungünstig ist. Auch bei großer Ungleichförmigkeit des Maschinenganges wäre er ungünstig; doch ist diese gerade bei hohen Umlaufzahlen nicht zu befürchten. — Verkürzung des Trommelhubes vermindert natürlich auch die Massenwirkungen, doch ist das kleinere Diagramm ungenauer zu planimetrieren.

Eine Größe, die auf alle Fälle Fehler ins Diagramm bringt, ist die Reibung der Trommel in ihrer Achse. Zwar würde sie in Gleichung (2) ein konstantes Glied liefern, aber dessen Vorzeichen würde in den Totpunkten wechseln. Die Trommel wird hinter dem Totpunkt eine Zeitlang ganz stehenbleiben, bis die Reibung überwunden ist und der Rückgang eintritt; die beim Hin- und beim Rückgang gezeichneten Diagrammteile wären gegeneinander verschoben; von Proportionalität kann also keine Rede sein; eine zeichnerische Ergänzung der unterdrückten Diagrammenden, unter Beseitigung der Verschiebung, würde von zweifelhaftem Wert sein. Man muß also auf Verminderung der Reibung bedacht sein, deren Einfluß übrigens bei gut instand gehaltenen Indikatoren gering zu sein scheint.

Im ganzen wird man daher folgern dürfen, daß die Unrichtigkeiten der Trommelbewegung, sekundären Ursachen entspringend, sich in mäßigen Grenzen halten werden. Immerhin ist es eine wichtige Regel, auf möglichst geringe Schnurdehnung zu sehen. Die besonders hergestellte Indikatorschnur ist bedeutend weniger dehnbar als gewöhnlicher Bindfaden. Außerdem achte man darauf, daß die Schnur vom Hubminderer zur Trommel möglichst kurz ausfällt, denn ihre Dehnung kommt unverkürzt ins Diagramm. Die übliche Methode, je zwei Indikatoren von einem Hubminderer aus anzutreiben, wobei die erste Trommel die zweite antreibt, ist bei langhubigen Maschinen anfechtbar: die Bewegung der zweiten Trommel wird falsch.

93. Zeichnerische Eliminierung der Massenschwingungen[1]. Die Bewegung des Schreibstiftes stellt nicht den Verlauf der Spannung dar, sondern weicht um soviel davon ab, wie der Einfluß der Dämpfung, der Reibung und der Massenkräfte ausmacht. Man kann, jedoch nur im Zeitdiagramm, aus der vom Schreibstift aufgezeichneten Kurve der tatsächlichen Kolbenwege s (des Indikatorkolbens) den Verlauf der Spannung p, der uns interessiert, ableiten, indem man den Einfluß der genannten Größen eliminiert. So könnte man in Fig. 5, an der wir das allgemeine Verhalten der Instrumente darlegten, aus der vom Instru-

[1]) Wagener, a. a. O.; Borth, Forschungsarbeiten Heft 55.

ment gegebenen Kurve den Verlauf der zu messenden Größe, der dort durch die starke Kurve XY dargestellt war, abzuleiten unternehmen.

Auf den Indikatorkolben wirken zu jeder Zeit t die folgenden Kräfte: Die zu messende Spannung p wirkt aufwärts auf die Kolbenfläche f; bezeichnen wir die aufwärtsgehenden Kräfte als positiv, so ist die der Spannung entsprechende Kraft $+ p \cdot f$. Die Feder drückt den Kolben abwärts mit einer Kraft, die von dem Federmaßstab c und der Abweichung s des Kolbens von der Ruhelage abhängt; die Kraft ist $-c \cdot s$. Die Reibung pflegt man in solchen Untersuchungen als konstant einzuführen, doch wechselt sie ihr Vorzeichen mit der Bewegungsrichtung; sie übe die Kraft $\pm w$ auf den Kolben aus. Die durch molekulare Dämpfung vernichtete Energie pflegt man dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional zu setzen; die von ihr ausgeübte Kraft wäre dann der Geschwindigkeit $\frac{ds}{dt}$ der gedämpften Teile proportional; sie würde unter Einführung eines Proportionalitätsfaktors ε, des Dämpfungsfaktors, $-\varepsilon \cdot \frac{ds}{dt}$ zu schreiben sein, nur mit negativem Vorzeichen, da sie zwar der Bewegung entgegenwirkt, hier aber der Zeichenwechsel automatisch mit dem Richtungswechsel erfolgt.

Fügen wir zu diesen äußeren Kräften die Massenkraft hinzu, die durch die Masse m und die Beschleunigung $\frac{d^2s}{dt^2}$ des Kolbens gegeben ist und die, als der Geschwindigkeitszunahme entgegengesetzt, mit $-m \cdot \frac{d^2s}{dt^2}$ anzusetzen ist, so können wir den Kolben als im Gleichgewicht befindlich betrachten und die Gleichgewichtsbedingung anschreiben:

$$p \cdot f - c \cdot s - \varepsilon \cdot \frac{ds}{dt} \pm w - m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = 0$$

oder

$$p \cdot f = c \cdot s + \varepsilon \cdot \frac{ds}{dt} \pm w + m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Es fragt sich, ob außer den im Indikatordiagramm gegebenen Werten von s alle übrigen Glieder der rechten Seite bestimmbar sind. Das ist nun in der Tat der Fall. Bei s selbst ist freilich schon zu beachten, daß es die Kolbenwege vergrößert darstellt, meist in sechsfachem Maßstab; außerdem ist der Kolbenweg in Metern zu entnehmen, da man sich bei den nun zu besprechenden komplizierten Ermittlungen am besten streng an das Maßsystem hält; die Ermittlung der Maßstäbe ist ohnehin oft schwierig. Weiter ist der Federmaßstab c ohne weiteres bekannt; hier ist er allerdings nicht in mm/at, sondern, da alle Glieder unserer Gleichung in Kilogramm gegeben sein sollen, in kg/m anzugeben und nicht auf den Schreibstift-, sondern auf den Kolbenweg zu beziehen; eine Feder, die bei einer Spannungseichung 1,972 mm/at ergeben hat, die mit einem Kolben von 9,985 mm Durchmesser, entsprechend

0,7830 qcm Fläche arbeitet und ein Schreibzeug von sechsfacher Übersetzung betätigt, erfährt durch 0,7830 kg Kraft die Durchbiegung $\frac{1,972}{6}$ mm = 0,000329 m; es ist $c = \frac{0,7830}{0,000329} = 2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$. Es ist dies die Federkonstante der Feder. — Ferner sind nun $\frac{ds}{dt}$ und $\frac{d^2s}{dt^2}$ durch zweimaliges Differenzieren der als Funktion von t aufgezeichneten s-Kurven, also der Zeitdiagramme, zu finden; dazu dient der Spiegelderivator (S. 243); um die wünschenswerte Genauigkeit beim Differenzieren zu erreichen, muß man durch Wahl der Ablaufgeschwindigkeit des Diagrammpapiers für passende (S. 244) Neigung der Kurven sorgen.

Es bleiben durch besondere Versuche zu finden: ε, w und m. — Man kann zunächst den Wert der *Reibung* ermitteln, indem man den Indikatorschreibstift einmal hochdrückt und langsam in die Ruhelage kommen läßt, das andere Mal das gleiche von abwärts kommend tut. Der Unterschied dieser beiden Ruhelagen entspricht der doppelten Reibung. Der Maßstab ergibt sich ohne weiteres; wäre bei obengenannter Feder der Unterschied 0,2 mm, so macht die Reibung linear im Diagramm $\pm$ 0,1 mm aus; dem entspricht $w = \frac{2380 \cdot 0,0001}{6} = 0,04$ kg.

Die Masse m durch Wägung zu finden ist nicht angängig, da es sich nicht um die Masse des Kolbens allein handelt, sondern auch um die der Schreibstiftführung und der Feder; beide aber haben in ihren verschiedenen Teilen verschiedene, von der des Kolbens abweichende Geschwindigkeiten, und eine Reduktion aller auf die Kolbengeschwindigkeit ist bei der komplizierten Konfiguration der Teile schwierig. Die Masse m und der Dämpfungsfaktor ε lassen sich aber aus den allgemeinen Schwingungsgesetzen bestimmen. Insbesondere läßt sich verwenden der Ausdruck für die Dauer einer vollen (Doppel-)Schwingung

$$t_s = \frac{4\pi m}{\sqrt{4cm - \varepsilon^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

und für das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplituden, die wir mit x' und x'' bezeichnen wollen; wenn wir unter diesen beiden Werten nicht das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender positiver, sondern zweier aufeinanderfolgender Amplituden ungleichen Vorzeichens verstehen, die also nur um $\frac{1}{2} t_s$ auseinanderliegen, so ist

$$\ln \frac{x'}{x''} = \frac{\varepsilon \cdot \frac{1}{2} t_s}{2m} = \frac{\varepsilon \cdot t_s}{4m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Wir schreiben

$$\ln \delta = \frac{\varepsilon \cdot t_s}{4m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

In Gleichung (5) und (6) können wir t_s und $\delta = x' : x''$ durch Ausmessung an einem Diagramm entnehmen und daher die beiden dann

verbleibenden Unbekannten m und ε berechnen. Setzen wir zunächst $\varepsilon = \frac{4\,m \cdot \ln\delta}{t_s}$ in (4) ein und lösen nach m auf, so ergibt sich

$$m = \frac{c \cdot t_s^2}{4\,(\pi^2 + [\ln\delta]^2)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Hieraus können wir die Masse der bewegten Teile ein für allemal berechnen. Da man verschiedene Kolbenmassen und auch wohl nach Bedarf wechselnde Zusatzmassen verwendet, um den Schwingungen eine für die Auswertung bequeme Größe zu geben, und die Berechnung der Dämpfung wegen ihrer wechselnden Größe nicht ein für allemal gemacht werden kann, so ist es bequem, für Berechnung von ε die Schwingungszeit zu eliminieren; man setzt den Wert von t_s aus (4) in (6) ein und erhält

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{4\,c\,m \cdot (\ln\delta)^2}{\pi^2 + (\ln\delta)^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Man schreibt nun ein besonderes Schwingungsdiagramm mit Hilfe des zu benutzenden Indikators, indem man den Kolben zunächst hochhebt, etwa durch Unterklemmen einer kleinen Gabel unter das Kugelgelenk K der Fig. 196, und dies Hindernis plötzlich entfernt. Die Federspannung löst Schwingungen aus, deren Verlauf man auf umlaufender Trommel abhängig von der Zeit aufschreibt. Fig. 249 gibt ein Schema des entstehenden Diagrammes. Wenn wir die Papiergeschwindigkeit gemessen haben, so ist die Schwingungszeit ohne weiteres in Gestalt der Strecke t_s abzumessen, nachdem man die Stelle größten Ausschlages durch Halbieren einer Sehne $k\,k$ gefunden hat. Nicht so einfach ist die Entnahme von δ. Hierunter ist das Verhältnis der aufeinanderfolgenden Amplituden rein gedämpfter Schwingungen zu verstehen; die mit dem Indikator aufgezeichneten Schwingungen enthalten aber auch den Einfluß der Reibung, deren Größe in schon besprochener Weise durch den Abstand der Linien $R_1 R_2$ zu beiden Seiten der reibungslosen Ruhelage M gegeben ist. Nun wirkt die Reibung in konstanter Größe der Bewegung entgegen und wird daher durch den gebrochenen Zug $BDFHK\ldots$ dargestellt, wobei der Sprung immer an der Stelle größter Amplitude der Schwingung eintritt. Von A bis C kann man die Schwingung als um das Mittel B er-

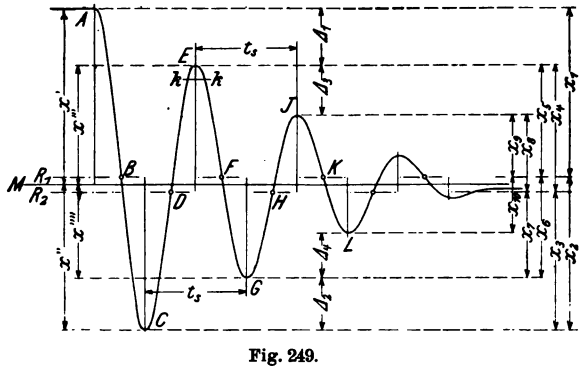


Fig. 249.

folgend, von C bis E als um D herum erfolgend betrachten, und so fort. Dann hat man als δ das Verhältnis $x_1 : x_2$, oder auch $x_3 : x_4 \ldots$ anzusehen. Man hat also, die Größe der Reibung wieder mit w und die von M aus gemessenen Amplituden mit x', $x'' \ldots$ bezeichnet, zu entnehmen $\delta = \frac{x' - w}{x'' + w} = \frac{x'' - w}{x''' + w} = \ldots$ Man kann aber auch die Benutzung von w umgehen. Es läßt sich nämlich daraus, daß $\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_3}{x_4} = \ldots$ und auch $\frac{x_1}{x_5} = \frac{x_5}{x_9} = \ldots$ ist — weil das die Amplituden der rein gedämpften Schwingungen sind — beweisen, daß $\delta = \frac{(x_1 - x_5) + (x_2 - x_6)}{(x_5 - x_9) + (x_6 - x_{10})} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_3 + \Delta_4}$ ist; und diese Größen sind im Diagramm ohne weiteres abzugreifen.

Als *Beispiel* ist in Fig. 250 ein Diagramm gegeben, das zur Bestimmung der Masse, und in Fig. 251 eines, das zur Bestimmung der Dämpfung gedient hat, und zwar an demselben Indikator, dessen Federkonstante wir schon gaben. Nach Fig. 250 sind 3 Schwingungen

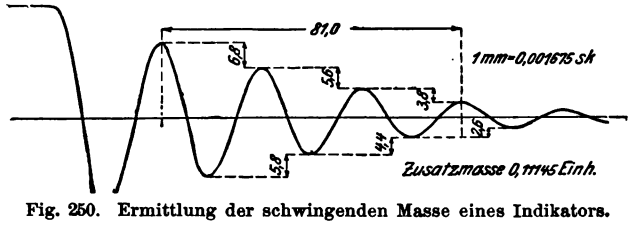


Fig. 250. Ermittlung der schwingenden Masse eines Indikators.

$= 81{,}0$ mm $= 81{,}0 \cdot 0{,}001675 = 0{,}1357$ sek, also ist $t_s = 0{,}0452$ sek. Für die Dämpfung dieses Diagrammes ist zu entnehmen $\delta = \frac{6{,}8 + 5{,}8}{5{,}6 + 4{,}4} = \frac{12{,}6}{10{,}0} = 1{,}26$. Nach (7) wird die schwingende Masse $m = \frac{2380 \cdot 0{,}002043}{4\,(9{,}870 + 0{,}053)} = 0{,}1220$ Einheiten. Bei dem Versuch war, um die Schwingungen zu vergrößern und langsamer zu machen, eine Zusatzmasse eingebaut, die die Kolbenstange umgab; sie kann sonst auch an der unten durchzuführenden Kolbenstange befestigt werden, oder in Fig. 210 sieht man oben eine hierfür bestimmte Verlängerung der Kolbenstange herausschauen; diese Zusatzmasse war mit dem Kolben zusammen gewogen, sie wog 1,0933 kg entsprechend $\frac{1{,}0933}{9{,}81} = 0{,}1114$ Masseneinheiten. Also ist die auf den Kolben reduzierte Masse des Schreibzeuggestänges einschließlich der Feder (für deren jede der Versuch besonders zu machen wäre) $0{,}1220 - 0{,}1114 = 0{,}0106$ Einheiten.

Die Dämpfung wird ihrer Veränderlichkeit wegen vor jedem Versuch nochmals bestimmt. Zu diesen Bestimmungen benutzt man, um die Verhältnisse der Benutzung möglichst anzunähern, gewöhnliche Indikatordiagramme, in denen genügende Schwingungen vorhanden sind; man

kann etwa bei einer Gasmaschine durch Einführung reicheren Gemisches den Explosionsstoß verstärken. Solchem Diagramm entstammt Fig. 249, ein Teil der Expansionskurve. Um bei dieser Aufnahme und bei den späteren Diagrammen, Fig. 251, gute Schwingungen zu erhalten, war eine Zusatzmasse verwendet, die mit Kolben 0,276 kg wog, entsprechend 0,0282 Masseneinheiten; einschließlich der schon bestimmten Masse von Schreibzeug und Feder wird $m = 0{,}0282 + 0{,}0106 = 0{,}0388$ Einheiten. Es sind zwei Kurven gezogen, die die Schwingungen einhüllen; durch Halbieren der Ordinaten ist die Mittelkurve erhalten worden, die den Druckverlauf darstellen wird, weil an dieser Stelle die Druckänderung gleichmäßig vor sich geht. Man ermittelt durch Halbieren der zur

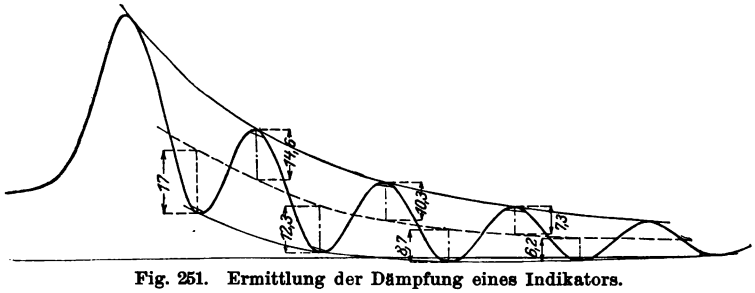


Fig. 251. Ermittlung der Dämpfung eines Indikators.

Mittelkurve parallelen Sehnen die Höchstpunkte und entnimmt die Amplituden; diese sind eingetragen; die Reibung von $w = 0{,}1$ mm ist abzuziehen oder zuzuzählen; so ergibt sich $\delta = \dfrac{17{,}0 - 0{,}1}{13{,}6 + 0{,}1} = 1{,}150$; und nach Gleichung (8) wird

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{4 \cdot 2380 \cdot 0{,}0388 \cdot 0{,}01952}{9{,}870 + 0{,}01952}} = 0{,}86 \frac{\text{kg} \cdot \text{sek}}{\text{m}}.$$

Fig. 252 gibt nun ein nach diesen Daten *berichtigtes Diagramm einer Gasmaschine* in der Nähe des Zündungstotpunktes. Die Kurve *1* ist mit dem Indikator indiziert worden; die Ableitung dieser Wegkurve ergab die Geschwindigkeitskurve *2*, die Ableitung dieser die Beschleunigungskurve *3*. Diese Kurven sind in abweichendem Maßstab unter das Hauptbild gezeichnet. Unter Beachtung der vorher ermittelten Werte des Dämpfungsfaktors und der Masse ergeben sich die angeschriebenen Maßstäbe als Wert der Dämpfung und der Massenkraft; die Reibung ist so eingetragen, daß man sie ohne weiteres zur Dämpfung hinzuzählen kann. Wenn wir nun die Kurven *2*, *3* und *4* unter Beachtung der Maßstäbe und Vorzeichen zu *1* hinzufügen, so erhalten wir in Gestalt der Kurve *5* den Druckverlauf im Indikatorzylinder. Man sieht, daß auch hier (wie in Fig. 238) der Höchstdruck ein ganz anderer ist, als nach dem Diagramm unmittelbar zu entnehmen gewesen wäre; allerdings war ja, um auswertbare Schwingungen zu erhalten, die Indikatormasse vergrößert. Man sieht auch, wie gut der Ausgleich der Schwingungen vor sich geht, und wie glatt die wahre Druckkurve ver-

läuft. Man sieht endlich, daß für die gleichmäßig verlaufende Expansionslinie die richtige Druckkurve recht gut als Mittelkurve der beiden Einhüllenden zu finden ist, so daß für das umständliche Auswertungsverfahren nur dann Bedarf vorhanden ist, wenn man den

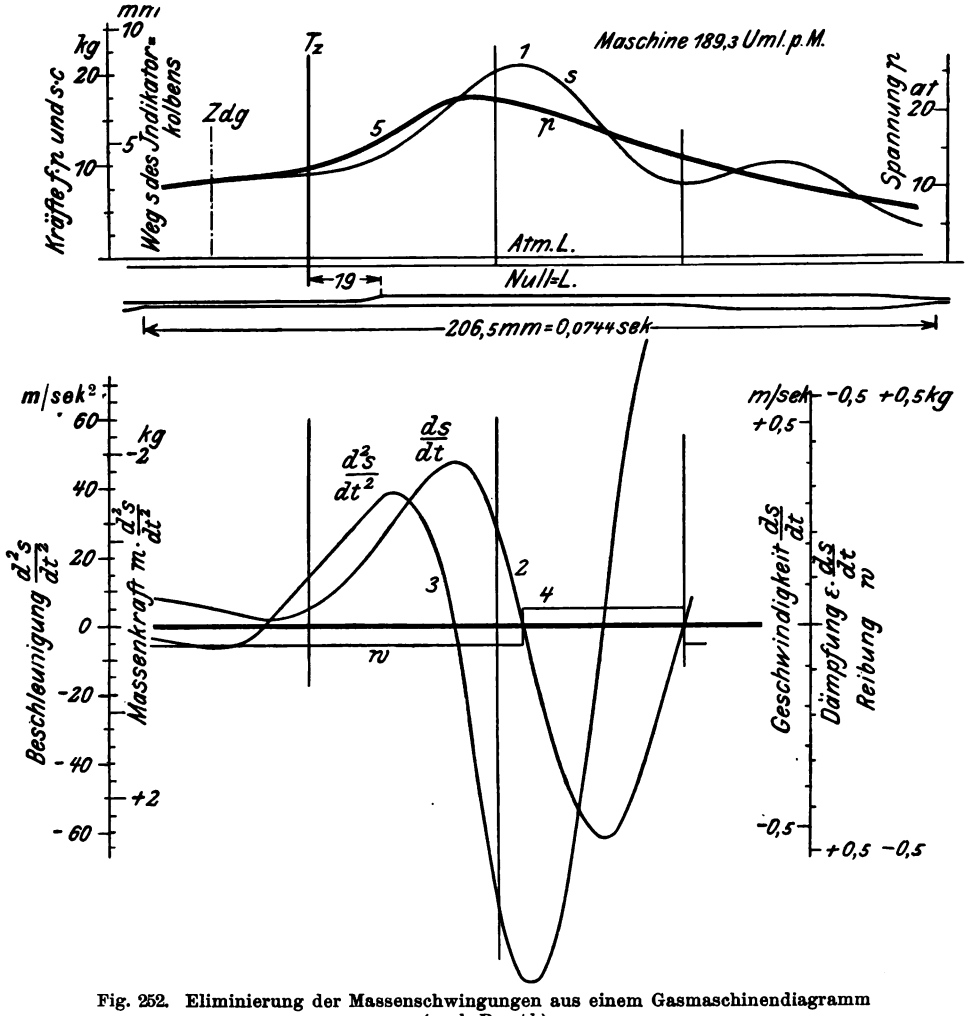


Fig. 252. Eliminierung der Massenschwingungen aus einem Gasmaschinendiagramm (nach Borth).

Höchstdruck und die Vorgänge bis zur Erreichung desselben studieren will.

Die *Ermittlung der Maßstäbe* sei kurz erläutert. Wegen der Schreibstiftübersetzung ist s sechsfach vergrößert aufgetragen; die Federkonstante ist 2830 kg/m, also der Kräftemaßstab in der oberen Figur[1])

[1]) Das heißt im Original. Fig. 252 gibt das Original auf die Hälfte verkleinert wieder.

6000 mm = 2380 kg; 1 mm = 0,397 kg oder 1 kg = 2,52 mm. — Der Maßstab der Beschleunigungen folgt aus den Einzelmaßstäben:

s : 0,01 m = 60 mm oder 1 mm = 0,000167 m
t : 0,0744 sek = 206,5 mm oder 1 mm = 0,000360 sek

$$\text{also } 1 = \frac{0{,}000167}{0{,}000360} = 0{,}464 \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Diese Geschwindigkeit entspricht der Kurvenneigung 45°, dessen Tangens 1 ist. Wir können den Maßstab für diese Größe wählen, wie wir wollen; es ist 48 mm als Einheit angenommen; dann ist 48 mm = 0,464 m/sek; 1 mm = 0,00965 m/sek oder 1 m/sek = 103,6 mm; mit dem Dämpfungsfaktor $\varepsilon = 0{,}86$ wird der Maßstab der Dämpfung:

$$1 \text{ mm} = 0{,}00965 \cdot 0{,}86 = 0{,}00830 \text{ kg} \quad \text{oder} \quad 1 \text{ kg} = \frac{103{,}6}{0{,}86} = 120{,}5 \text{ mm}.$$

Entsprechend ist dann der Maßstab der Beschleunigungen und Massendrucke zu berechnen. —

Will man ähnliche Ermittlungen an Pumpen machen, so hat man das auf S. 292 Gesagte zu beachten, nämlich daß die dem Hubvolumen des Indikators entsprechende Wassermasse mitschwingen muß, um die Bewegungen des Kolbens zu ermöglichen; dieselbe ist sogar nicht nur einfach, sondern wegen des meist geringeren Bohrungsdurchmessers und der dementsprechenden größeren Geschwindigkeit vielfach in Rechnung zu setzen. Ohne Berücksichtigung dieser Masse erhielte man nur die Spannungsänderungen im Indikator, während man doch die im Maschinenzylinder kennen will.

94. Besondere Anwendungen des Indikators. Der Indikator ist ein registrierender Spannungsmesser, oder wenn er zur Aufzeichnung von Kolbenwegdiagrammen benutzt wird, ein Arbeitsmesser. Er läßt aber auch manche andere Verwendung zu, bei denen das Vorhandensein einer guten Schreibstiftführung und einer eichbaren und auswechselbaren Meßfeder angenehm ist.

Insbesondere kann man den Indikator als *Kraftmesser* benutzen, indem man eine zu messende Kraft, etwa die vom Arm einer Bremse ausgeübte, durch eine Druckstange auf den Indikatorkolben wirken läßt; will man dabei den Indikatorkolben schonen, so ersetzt man ihn durch eine Führungsstange, die an die Feder und an die Kugelgelenkmutter paßt. Man wird die Diagramme bei dieser Verwendung des Indikators auf die umlaufende Trommel oder auf ein Papierband schreiben; läßt man das Papier mit gleichbleibender Geschwindigkeit laufen, so erhält man P-t-Diagramme; durch Ausmessen der unter der entstehenden Kurve enthaltenen Flächen $\int P \cdot dt$ erhält man die der bewegten Masse m erteilten oder entzogenen Geschwindigkeiten w: es ist $\int dw = \frac{1}{m} \cdot \int P \cdot dt$ (Satz vom Antrieb). — Wenn man dagegen das Papier von der Maschinenwelle aus antreibt, so daß es sich nicht gleichförmig, sondern mit einer Geschwindigkeit bewegt, die der Geschwindigkeit der bewegten Masse proportional

ist, so erhält man ein P-s-Diagramm; durch Ausmessen der unter der entstehenden Kurve enthaltenen Flächen $\int P \cdot ds$ erhält man die der bewegten Masse m erteilte oder entzogene Arbeit A: es ist $\int dA = \int P \cdot ds = \frac{m}{2} \cdot (w_2^2 - w_1^2)$ (Satz von der Arbeit). Man wird natürlich im allgemeinen Zeit und Weg auf dem ablaufenden Papierstreifen durch ein schwingendes oder durch zwei Markenschreibzeuge aufschreiben lassen. — Die gebräuchlichen Indikatorfedern genügen zur Messung bis zu 60 kg. Sind größere Kräfte zu registrieren, oder will man die Registrierung von Kräften durch Verwendung weicher Federn in größerem Maßstab erhalten, so muß man einen Teil der Kraft durch Gewichte ausgleichen; dann wird der Überschuß über das Ausgeglichene aufgeschrieben.

Man kann ferner den Indikator benutzen, um die Bewegung irgendwelcher zwangläufig bewegter oder selbsttätig arbeitender Maschinenteile aufschreiben zu lassen; es handelt sich namentlich um die Bewegung der Steuerungsorgane von Kolbenmaschinen, also von Ventilen, Schiebern und Hähnen. Man überträgt dazu die Bewegung des zu untersuchenden Organes auf den Kolben des Indikators mittels einer Druckstange und stellt den Kraftschluß her durch Einbauen einer schwachen Indikatorfeder, die sonst zu dieser Aufnahme gar nicht nötig wäre und deren Federmaßstab gleichgültig ist. Man kann diese *Ventilerhebungsdiagramme* als Kolbenweg- oder als Zeitdiagramme aufschreiben, indem man entweder die vom Kreuzkopf aus angetriebene schwingende Trommel oder aber eine rotierende Trommel oder ein Papierband verwendet. Kolbenwegdiagramme einer Schiebermaschine liefern die sogenannte Schieberellipse; bei Ventilen und Hähnen ergeben sich entsprechende Kurven. Da aber hauptsächlich die Eröffnung und der Abschluß zu interessieren pflegen, und diese oft in der Nähe des Totpunktes liegen und dann verkürzt wiedergegeben werden, so muß man zur Ermittlung der dort eintretenden Vorgänge Zeitdiagramme aufnehmen; an diesen kann man dann auch durch zweimaliges Ableiten die auf das Steuerorgan wirkenden Kräfte bestimmen, in ähnlicher Weise, wie es bei den Bewegungen des Indikatorkolbens möglich war. Auch versetzte Ventilerhebungsdiagramme kann man natürlich aufnehmen; ein solches findet sich in Fig. 248 dargestellt. Kann man die sechsfache Übersetzung nicht brauchen, so bringt man den Schreibstift selbst mit dem Ventil in Verbindung.

95. Besondere Bauarten des Indikators. An besonderen Bauarten des Indikators mögen noch die folgenden nur erwähnt werden.

Zum Indizieren der *Kältekompressoren*, die mit Ammoniak arbeiten, hat man Spezialinstrumente, die ganz unter Ausschluß von Bronze aus Eisen und Stahl hergestellt sind. Ammoniak nämlich greift Kupferlegierungen an. — Gelegentlich kann man eine Ammoniakmaschine mittels gewöhnlichen Indikators ohne wesentliche Schädigung der vitalen Teile indizieren, wenn man nach jedem genommenen Diagramme das Schreibzeug herausnimmt und den Kolben vor dem Neueinsetzen gut mit Kompressorenöl bedeckt.

Man hat Indikatoren für *fortlaufende Diagrammaufnahme*. Um die Anlaufverhältnisse von Maschinen zu untersuchen — in Frage kommen namentlich Fördermaschinen, auch wohl Lokomotiven — wünscht man Diagramme dauernd während der ganzen Anlaufperiode aufzunehmen, da jedes folgende Diagramm anders ausfällt als das vorhergehende. Nimmt man mittels einfachen Indikators ein Dauerdiagramm, so überdecken sich die Diagramme, so daß man sie nicht mehr auseinanderfinden, insbesondere nicht ihre Reihenfolge erkennen kann. Bei den in Rede stehenden Indikatoren wird nun das Dauerdiagramm auf einen mäßig langen Papierstreifen aufgenommen, welcher in der entsprechend veränderten Papiertrommel untergebracht ist. Die Papiertrommel erfährt eine hin und her gehende Bewegung wie immer. Außerdem aber wird am einen Hubende immer der Papierstreifen einige Millimeter fortgeschoben, so daß die einzelnen Diagramme genügend auseinanderfallen. Wegen der Einzelheiten der Trommelkonstruktion verweisen wir auf die Prospekte.

Ganz besonders hat sich in den letzten Jahren der Indikatorbau darauf gelegt, Indikatoren zu schaffen, die bei *tunlichst hohen Umlaufzahlen* noch brauchbar bleiben. Im allgemeinen nimmt die Schwierigkeit des Indizierens mit wachsender Umlaufzahl schnell zu, wenngleich es strenggenommen nicht so sehr auf die Tourenzahl an sich ankommt, als auf die zeitliche Geschwindigkeit, mit der Druckänderungen in dem zu indizierenden Zylinder eintreten. So ist beispielsweise das Indizieren von Dieselmaschinen noch bequem mit Indikatortypen möglich auch bei Tourenzahlen, bei denen das Indizieren von Verpuffungsmaschinen wegen der plötzlichen Drucksteigerung nach erfolgter Zündung nicht mehr zu brauchbaren Diagrammen führt.

Kommt man über die Grenze heraus, wo die Bewegungen des Schreibstiftes durch Massenschwingungen und die Bewegungen der Trommel durch Schlaffwerden der Schnur unsicher werden, so kann man zunächst durch Verkleinern der Schreibstift- und der Trommelwege Abhilfe schaffen (vgl. § 90 und 92).

Wirksamer aber als dies ist die Verwendung besonders kleiner Indikatortypen zum Indizieren schnellaufender Verpuffungsmotoren, wie derjenigen von Flugzeugen und Kraftwagen. Ein solcher war schon in Fig. 215 dargestellt worden, Fig. 253 zeigt einen im Bilde. Innerhalb gewisser Grenzen kann auch die Verwendung von Aluminium oder von Dur-Alumin für die bewegten Teile Besserung schaffen, wenngleich für den Schreibhebel bei höherer Tourenzahl selbst bei Verwendung von Stahl Verbiegungen an der Tagesordnung bleiben. Auch werden im ganzen durch solche Bauarten die Massenwirkungen nur verringert, nicht aber der Art nach beseitigt, sie werden bei hohen Umlaufzahlen über 800 bis 1000 hinaus immer noch störend, so zwar, daß man auch bei Verwendung der besten Indikatortypen die Verwendung des Indikators nur noch in qualitativer Hinsicht, nicht in quantitativer empfehlen kann: er ist ein wertvolles Mittel zur Verbesserung des Verbrennungsvorganges, weniger aber zur Leistungsermittlung.

Das antreibende Getriebe wird mit dem Indikatorgehäuse durch

die Stange *F* aus Formeisen verbunden. Der Indikator selbst muß genügend stabil mit der Maschine verbunden sein. Bei *K* ist eine Kühlvorrichtung in die Druckzuleitung eingeschaltet.

Auf anderem Wege sucht der *optische Indikator* zum Ziel zu kommen, indem er, wie bei anderen Instrumenten üblich, die messenden Teile nur sehr kleine Ausschläge machen läßt, die unter Verwendung eines Spiegels beliebig vergrößert werden können.

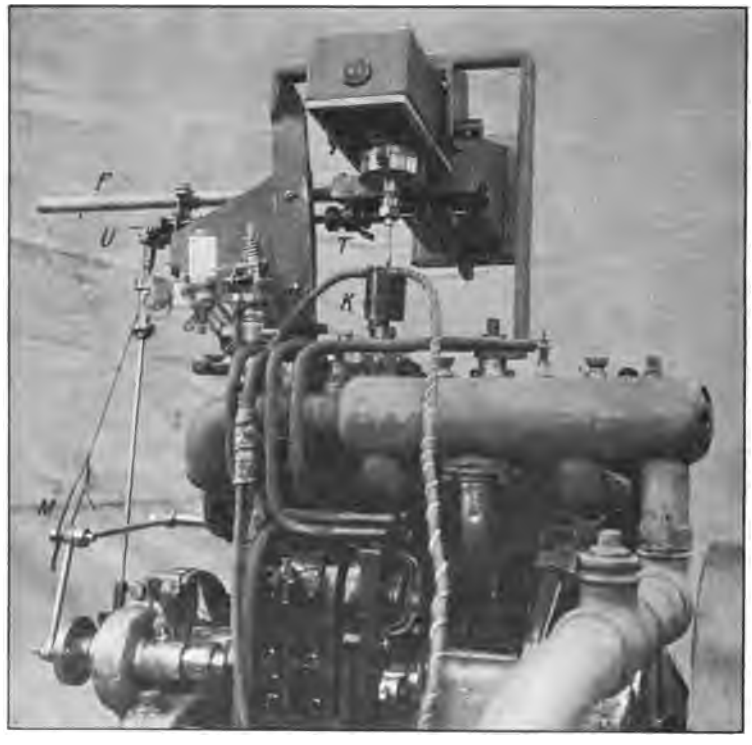


Fig. 253. Fahrzeugmotor mit angebautem, mechanischem Indikator (nach Fig. 215) und optischem Indikator (nach Fig. 254 bis 256).

Ein gut durchdachter optischer Indikator ist in Fig. 254 bis 256 im Schnitt dargestellt. Fig. 253 zeigt ihn, sowie einen Indikator der Bauart Fig. 215 im Bilde, angebaut an einen Fahrzeugmotor.

In Fig. 255 fällt ein Lichtstrahl aus der Lampe auf den Spiegel und wird von diesem so reflektiert, daß er weiterhin eine Mattscheibe trifft, die zum Einstellen des Bildes und eventuell zum Nachzeichnen des Diagramms mit Bleistift dient. An Stelle der Mattscheibe kann nach Bedarf in bekannter Weise die Kassette mit der photographischen Platte oder mit Bromsilberpapier gesetzt werden. Die Lichtquelle soll tunlichst punktförmig sein, man verwendet deshalb eine Nernstlampe; der Licht-

strahl wird überdies noch an zwei Stellen abgeblendet. — Der Spiegel tanzt auf der Spitze eines mit Gewinde nachstellbaren Haltestiftes *a*. Seine Bewegung ist eine doppelte. Um eine durch die Spitze des Haltestiftes senkrecht zur Bildebene gelegte Achse bewegt sich der Stift unter dem Einfluß des zu indizierenden Druckes, der durch den Druckstutzen unter eine Membran tritt. Der Druckmessung dient eine aus-

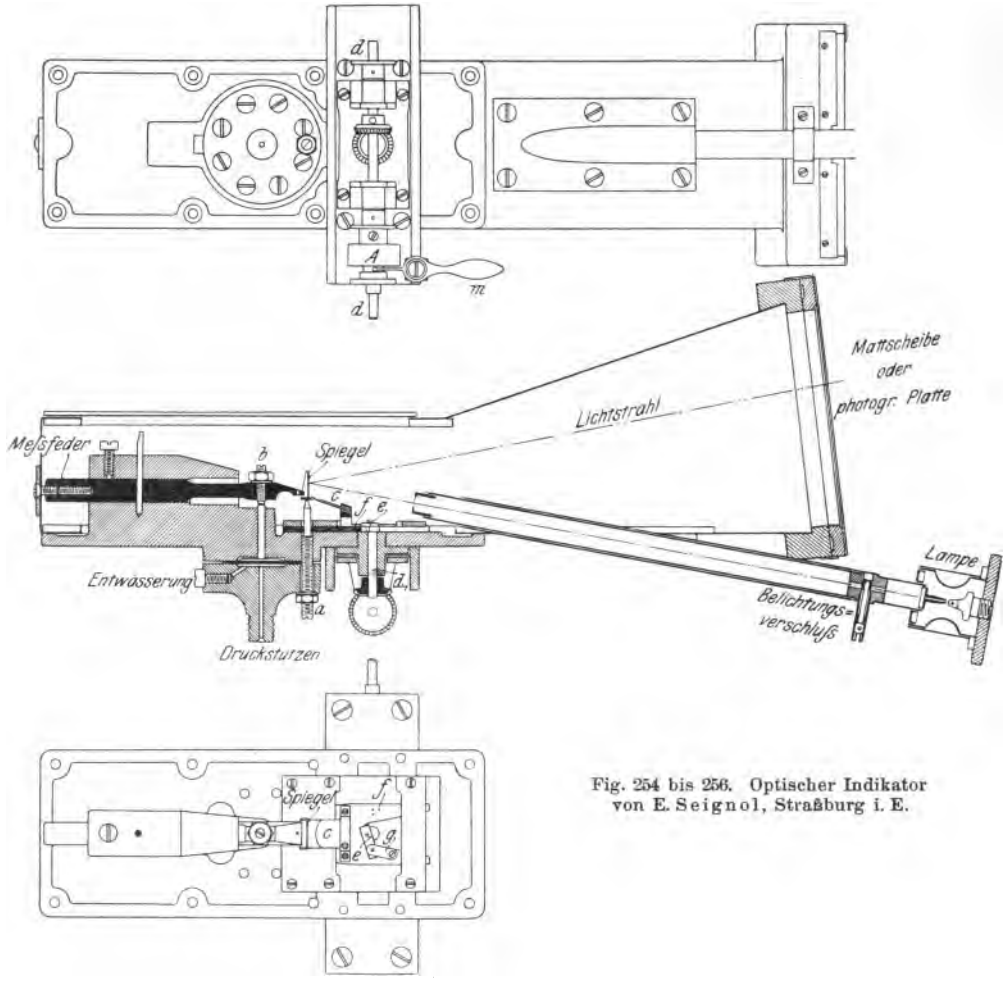


Fig. 254 bis 256. Optischer Indikator von E. Seignol, Straßburg i. E.

wechselbare Feder in Gestalt eines starken Stahlklotzes. Die Schraube *b* gestattet es, Meßfeder und Membran etwas gegeneinander zu verspannen, die Blattfeder *c* drückt den Spiegel gegen die Meßfeder. — Die zweite Bewegung um die Verlängerung des Haltestiftes *a* als Achse wird dem Spiegel durch einen kleinen Kurbeltrieb erteilt. Von der Maschinenwelle aus erfolgt in passender Weise durch Wellen- und Rädertrieb *U*, Fig. 253, der Antrieb der Welle *d* und abermals durch Kegeltrieb der Antrieb der

Welle d_1. Welle d_1 endet im Innern des Indikators in eine kleine Kurbelscheibe mit Zapfen. Über den Kurbelzapfen wird mit einem Loch die kleine Pleuelstange e geschoben, die andererseits mit einem Stift in eines der Löcher greift, deren mehrere sich in dem Treibstück f befinden. Es sind mehrere Pleuelstangen beigefügt, zu den Löchern im Treibstück f passend, so daß verschiedenem Schubstangenverhältnis der Maschine Rechnung getragen werden kann. Die Pleuelstange wird durch die kleine Feder g am Herabfallen gehindert. Das stiefelknechtförmige Treibstück f (in Fig. 255 schwarz) ist um den Haltestift a drehbar, es wird durch zwei übergelegte Bleche am Fortfallen gehindert. Um die Achse des Haltestiftes führt es, sobald Welle d angetrieben wird, schwingende Drehbewegungen aus, die den Bewegungen des Kolbens so lange proportional sind, wie man eine Drehbewegung mit einer geradlinigen verwechseln kann, das heißt also bei kleinen Ausschlägen. Die Drehbewegung des Treibstückes muß aber auch der Spiegel mitmachen, weil die Blattfeder c in einem Aufsatz des Treibstückes f eingeklemmt ist, und weil sie andererseits in eine vorn am Spiegel vorgesehene Rinne sich so einklammert, daß ein Gleiten der Feder c auf dem Spiegel nicht stattfinden kann; wohl aber wird während der Bewegung der rückwärtige Fuß des Spiegels unter dem Ende der Meßfeder hin und her gleiten.

Die Ausschläge des Spiegels nach beiden Richtungen werden in bekannter Weise Bewegungen des reflektierten Lichtstrahles nach je einer Achse veranlassen, und zusammen bewirken, daß der Lichtstrahl im Raum einen Kegel umschreibt, dessen Leitkurve das Indikatordiagramm ist. Die Vergrößerung, an sich beliebig, wird praktisch dadurch beschränkt sein, daß man zum Sehen sowohl wie zum Photographieren einer gewissen Lichtstärke bedarf. Die Lichtstärke aber nimmt mit der Vergrößerung linear ab. Bei höheren Umlaufzahlen wird das Diagramm, obwohl aus einem leuchtenden Punkt bestehend, vom Auge als zusammenhängend empfunden. Allerdings tanzt es namentlich in der Verbrennungslinie auf und nieder entsprechend der Streuung des Indikatordiagramms. Ein einigermaßen zuverlässiges Nachzeichnen ist daher nicht einfach. Man bedient sich zum Aufnehmen besser des photographischen Papieres. Bewährt hat sich Bromsilberpapier Marke M II von Dr. F. Stolze, Berlin-Charlottenburg. Um die Belichtung über eine bestimmte Anzahl von Spielen — etwa 5 wie beim gewöhnlichen Indikator — erstrecken zu können, ist ein Belichtungsschieber vorgesehen.

Auch der optische Indikator scheint sich mehr für qualitative als für quantitative Untersuchungen zu eignen. Es wird insbesondere darüber geklagt, daß die Ausschläge der Meßfeder nicht dem Druck proportional sind, so daß die Diagramme nicht ohne weiteres planimetrierbar sind. Auch die Eichung der Feder scheint noch Schwierigkeiten zu machen, insbesondere scheinen die elastischen Nachwirkungen erheblich zu sein.

Es ist in seltenen Fällen möglich, die Kegelräder von vornherein so in Eingriff miteinander zu bringen, daß der Totpunkt des kleinen Kurbeltriebes im Indikator mit dem Totpunkt der Maschine übereinstimmt. In geschickter Weise ermöglicht es die Kupplung T nachträglich

die Einstellung vorzunehmen. Es ist nämlich (Fig. 257) auf dem Gehäuse h ein Paßstück k aufgeschraubt, dessen beide Zähne ins Innere des Gehäuses eingreifen. Der Abstand der beiden Zähne voneinander ist nicht ein Vielfaches der Zahnteilung des Rades l, sondern um eine halbe Zahnteilung größer. Die Zähne des Stückes k erstrecken sich nur über reichlich die halbe Breite. Das Rad l kann nun durch den Griff m axial verschoben werden. So tritt beim Hin- und Herbewegen des Handgriffes eine ähnliche Wirkung auf, wie sie der Anker der Uhr auf das Steigrad ergibt: jedem Hube entspricht ein Vorwärtsschreiten der Teile k und l gegeneinander um eine halbe Teilung, jedem Hin- und Hergang des Handgriffes m ein solcher um eine ganze Teilung.

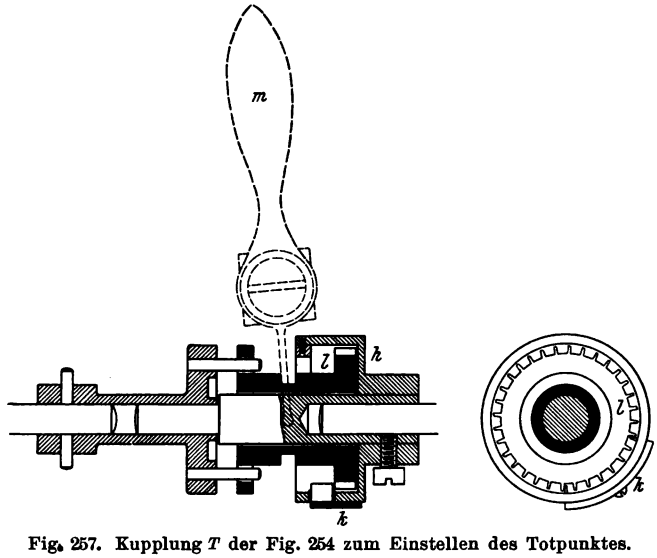


Fig. 257. Kupplung T der Fig. 254 zum Einstellen des Totpunktes.

Die Einstellung des Totpunktes geschieht durch Hin- und Herbewegen des Handgriffes m, während kurz die Zündung ausgesetzt wird: Kompressions- und Expansionslinie müssen zusammenfallen.

Der *Mikroindikator* von Mader will das Indizieren schnellaufender Maschinen ermöglichen, indem er den Schreibstift ohne Vergrößerungsgetriebe mit dem Kolben verbindet und als Nadel ausbildet. Statt der Trommel dient eine berußte Glasplatte, die nur kleine Bewegungen in der Ebene (nicht drehend) ausführt. Das Diagramm erhält eine Länge von wenigen Millimetern nach jeder Richtung und soll, mittels eines Ableseapparates mit Mikroskop ausgemessen, nach Bedarf auch photographisch vergrößert werden. Die Feinheit des auf der berußten Platte zu erzielenden Striches scheint jedoch nicht eine solche zu sein, daß bei der Vergrößerung eine befriedigende Genauigkeit leicht erzielt werden kann.

Zu billigen ist aber, gegenüber der Verwendung der gewöhnlichen Indikatoren, bei den beiden letztgenannten Instrumenten das Bestreben,

die Bewegungen des Kolbens möglichst zu verkleinern und dadurch die Fehler zu beseitigen, die durch Einfüllen und Entnehmen eines merklichen Gasvolumens aus dem Maschinenzylinder in den Indikatorzylinder und wieder zurück resultieren. Die hierzu erforderlichen Beschleunigungsdrucke ergeben bei hohen Umlaufzahlen merkliche Druckunterschiede zwischen Maschinenzylinder und Indikatorzylinder.

96. Arbeitszähler. Der Indikator gestattet den Arbeitsumsatz einzelner bestimmter, aber willkürlich herausgegriffener Arbeitsspiele zu ermitteln. Aus den Ergebnissen der Planimetrierung findet man auch die in bestimmter Zeit von der Maschine gelieferte Arbeit, wenn man annimmt, die herausgegriffenen Diagramme stellten den Durchschnittswert dar.

Immerhin gibt es Fälle, wo es bei stark und unregelmäßig schwankender Arbeitserzeugung nicht möglich ist, genügend viele Diagramme aufzunehmen, um einen brauchbaren Mittelwert zu erhalten. Auch wird der Zeitaufwand zum Planimetrieren der Diagramme erheblich.

Aus diesem Bedürfnis heraus war man, in den letzten Jahren mit Erfolg, bestrebt, Instrumente zu schaffen, die die Arbeitslieferung von Kolbenmaschinen fortdauernd so zur Messung bringen, daß man die bis zu einem beliebigen Zeitpunkt insgesamt gelieferte Arbeit an einem Zählwerk ablesen kann, in ähnlicher Weise, wie Wassermesser die insgesamt durchgegangene Wassermenge angeben.

Man bezeichnet die in Rede stehenden Instrumente gelegentlich als Leistungszähler. Diese Benennung ist falsch, denn gezählt wird nicht die Leistung, sondern die Arbeit.

Einen *Arbeitszähler* für Kolbenmaschinen zeigen Fig. 258 bis 260. Die Bildung des Produktes aus Kraft und Weg erfolgt durch das Zusammenarbeiten zweier miteinander als Reibgetriebe arbeitender Scheiben, die wir als Kraftscheibe und als Wegscheibe bezeichnen wollen. Letztere ist in Fig. 260 doppelt vorhanden; die beiden Wegscheiben W_1 und W_2, durch Kegelradtrieb verbunden, üben zusammen keine äußere Kraft auf die Kraftscheibe K aus, gegen die sie durch Druckfedern schwach angepreßt werden. Eine Rückführfeder dient dem gleichen Zweck wie die in der Trommel des Indikators. Die Wegscheiben werden so in Bewegung gesetzt, wie der Angriffspunkt der Kraft sich bewegt; bei fortschreitender Bewegung also hätten sie eine entsprechend fortschreitende Bewegung auszuführen, bei Kolbenmaschinen wird ihnen eine schwingend umdrehende Bewegung durch einen Schnurtrieb erteilt, der ähnlich dem Schnurtrieb des Indikators vom Kreuzkopf der Maschine abzweigt und den Kegeltrieb betätigt. — Zwischen den Stirnflächen der Wegscheiben bewegt sich die Kraftscheibe, und zwar wird sie, Fig. 259, unter dem Einfluß der zu messenden Kraft in Richtung eines Durchmessers über die Wegscheibenfläche bewegt. Ein Indikatorgetriebe mit Kolben einerseits und Meßfeder andererseits veranlaßt diese Bewegung der Kraftscheibe. Die jeweiligen Ausschläge sind der auf den Kolben wirkenden Kraft, also der Spannung proportional.

Dann wird die Kraftscheibe durch Reibung von den Wegscheiben in Drehung versetzt werden, und zwar werden die Drehwinkel sowohl der

Geschwindigkeit der Wegscheiben also des Maschinenkolbens, proportional sein, als auch werden sie vom jeweiligen Abstand des Berührungspunktes der Scheiben vom Mittel der Wegscheibe abhängen und daher

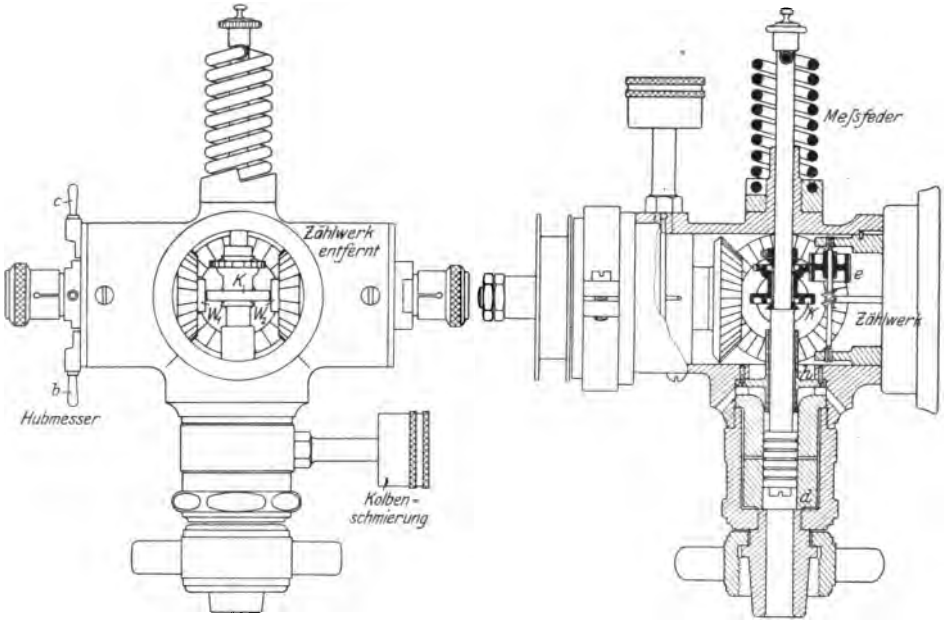


Fig. 258 bis 260. Gümbelscher Arbeitszähler von Lehmann & Michels.

von der im Zylinder herrschenden Spannung. Die Drehungen der Kraftscheibe aber werden durch ein Zahnradgetriebe auf ein Zählwerk übertragen; da das Zählwerk sich in Ruhe befindet, so ist durch einen langen Zahntrieb *e* für dauernden Eingriff trotz der Bewegungen der Kraftscheibe gesorgt.

Die Indikatorfeder ist jenseits der Kraftscheibe angebracht, sie ist auswechselbar in genau gleicher Weise wie die eines gewöhnlichen Indikators. Nur ist ihr Federmaßstab auf die Ausschläge des Kolbens zu beziehen, da die Übersetzung zum Schreibzeug hin fehlt.

Der besondere Hubmesser, Fig. 258, ist nötig, weil man die Diagrammlänge — den reduzierten Kolbenhub unter Berücksichtigung der Schnurdehnung — ohnedies nicht erkennen kann. Ein Mitnehmer drückt die

Stifte b und c auseinander, um so weiter, je größer der Hub der Wegscheiben.

Die Theorie des Instrumentes ist folgende (Fig. 261). Die Wegscheibe macht Winkelbewegungen, die proportional den vom Maschinenkolben zurückgelegten Wegen sind. Sei etwa mit k das Übersetzungsverhältnis im Hubminderer bezeichnet, bezeichnet r_1 den Radius der Antriebsscheibe am Arbeitszähler, und $d\alpha$ den Winkelausschlag der Wegscheibe, der dem Weg ds des Maschinenkolbens zugeordnet ist, so ist

$$d\alpha = \frac{k}{r_1} \cdot ds ;$$

bedeutet andererseits m den Maßstab der Indikatorfeder, so ist dies zugleich die Bewegung der Kraftscheibe, bei einer Druckänderung p um 1 atm. Wenn also im Ruhezustande die Kraftscheibe gerade im Zentrum der Wegscheibe steht, der Atmosphärenlinie entsprechend, so sind ihre Abweichungen r aus dieser Stellung und die Abstände des Berührungspunktes vom Zentrum der Wegscheibe gegeben durch

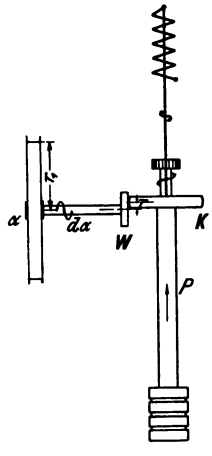


Fig. 261. Prinzip des Arbeitszählers.

$$r = m \cdot p .$$

Nun wird während eines Maschinenumlaufes der beliebige Teil ds des Kolbenweges und daher auch der zugehörige Winkelweg $d\alpha$ immer einmal vorwärts-, einmal rückwärtsgehend durchlaufen. Wenn dabei beim Vorwärtsgang ein Überdruck p im Zylinder geherrscht hat, so wird die Abwicklung der Kraftscheibe während der Durchschreitung des Winkelweges $d\alpha$ beim Hingange den Betrag annehmen

$$r \cdot d\alpha = m \cdot p \cdot \frac{k}{r_1} \cdot ds \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Möge beim rückgängigen Durchlaufen der Strecke ds die Spannung gerade $p = 0$ sein, so steht die Kraftscheibe im Mittelpunkt der Wegscheibe, eine Abwicklung findet überhaupt nicht statt, und als insgesamt vom Zählwerk verzeichnet ergibt sich der durch Formel (1) gegebene Wert, der also $p \cdot ds$ und damit der indizierten Arbeit proportional ist, die die Maschine beim Durchmessen des Wegstückes s hat freiwerden lassen.

Wäre aber beim Rückwärtsgang des Kolbens der Druck größer als Null gewesen, etwa $p' < p$, so wäre beim Rückwärtsgang ein Zurückschalten des Zählwerkes vom Betrage

$$r' \cdot - d\alpha = \frac{k \cdot m}{r_1} = p' \cdot - ds \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

eingetreten, und es hätte sich eine Bewegung des Zählwerkes nur im Betrage

$$\frac{k \cdot m}{r_1} \cdot (p - p')\, ds \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

ergeben. Das ist aber nach Fig. 193, S. 250 wieder die von der Maschine während des Hubstückes ds in Freiheit gesetzte Arbeit, Fläche $x\,x_1\,y_1\,y$.

Es läßt sich nun zeigen, daß die Angabe des Instrumentes auch richtig bleibt, wenn beim Diagramm einer Kondensationsmaschine der Druck unter die Atmosphärenlinie heruntergeht, so daß die Kraftscheibe Ausschläge nach unten macht, insbesondere während des Rückganges des Kolbens sich unterhalb des Wegscheibenmittels befindet. Tritt also während des rückgängigen Durchlaufens der Strecke ds ein Druck $-p''$ im Indikatorzylinder auf, so ergibt sich beim Rückwärtsgang eine Abwicklung im positiven Sinne deshalb, weil diesmal zwar r, aber auch α einen negativen Wert annimmt. Es wird also

$$-r'' \cdot -d\alpha = \frac{km}{r_1} \cdot -p'' \cdot -ds = +\frac{km}{r_1} \cdot p''\,ds \quad . . \quad (4)$$

und die gesamte Abwicklung des Zeigerwerks beim Vorwärts- und Rückwärtsdurchlaufen der Strecke ds, wobei der Druck einmal $+p$, einmal $-p''$ ist, wird

$$\frac{k \cdot m}{r_1} \cdot (p + p'')\,ds, \quad . . . . . \quad (5)$$

d. h. die oberhalb und unterhalb der Atmosphärenlinie liegenden Flächenstücke werden, wenn sie im gleichen Sinne umfahren sind, einfach zueinander addiert, so wie es auch das Planimeter tut.

Daraus folgt nun aber, daß überhaupt nicht die Kraftscheibe gerade auf das Mittel der Wegscheibe eingestellt sein muß, wenn der Druck Null beträgt. Die Bewegung des Zählwerks entspricht jederzeit dem Produkt aus dem Druckunterschied beim hin- und rückläufigen Durchmessen des Weges ds und der Größe dieses Weges ds selbst. Die Atmosphärenlinie spielt hierbei ebensowenig eine Rolle, wie sie es für die Auswertung des Indikatordiagramms tut.

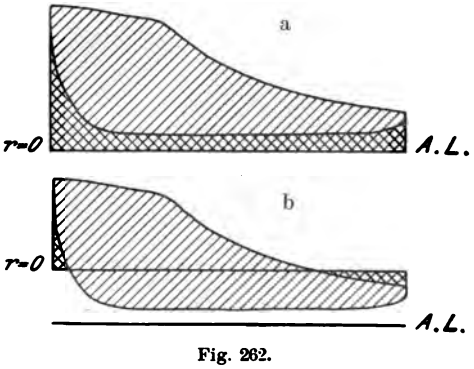


Fig. 262.

Es ist aber doch nicht gleichgültig, welcher Druck der Stellung der Kraftscheibe im Mittelpunkt der Wegscheibe zugeordnet ist. Denn wenn auch theoretisch durch Ablesung am Zählwerk das gleiche Endresultat ermittelt wird, so kommt es doch auf verschiedene Weise zustande. In Fig. 262 ist das Zustandekommen des Endergebnisses für zwei Fälle dargestellt. Beidemal ist das gleiche Diagramm des Hochdruckzylinders einer Dampfmaschine gezeichnet. In Fig. 262a fällt die Einstellung $r = 0$ der Kraftscheibe mit der Atmosphärenlinie zusammen. Dann wird die rechts schraffierte Fläche beim Hingang vom Zählwerk registriert, die

links schraffierte beim Rückgang davon abgezogen, die kreuzschraffierte Fläche hebt sich fort, und die nur rechts schraffierte bleibt übrig. Verlegen wir die Nullstellung der Kraftscheibe oberhalb der Atmosphärenlinie so hoch, wie Fig. 262b es angibt, so sind die Verhältnisse erheblich günstiger: Es ist zu erstreben, daß nur möglichst kleine kreuzschraffierte Flächen einmal vorwärts und einmal rückwärts durchlaufen werden, weil nämlich dann, mit den von der Kraftscheibe und dem Zählwerk zurückzulegenden Abwicklungen, auch die Massenwirkungen geringer werden. Überschreitet man dagegen die günstigste Stellung, so treten wieder ungünstig große kreuzschraffierte Flächen auf.

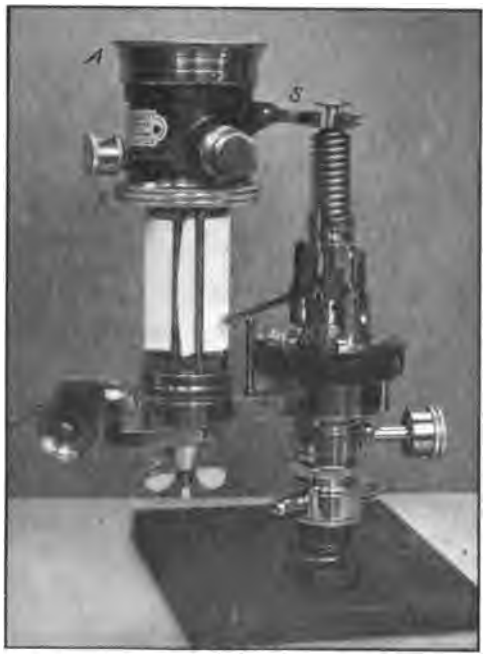


Fig. 263. Gümbelscher Arbeitszähler in fester Verbindung mit einem Indikator nach Fig. 206.

Bei den Hochdruckzylindern von Dampfmaschinen ergeben sich also ungünstige Verhältnisse, wenn man den Nullpunkt der Kraftscheibe mit der Atmosphärenlinie zusammenlegt. Bei Viertaktölmaschinen hingegen wird man den Nullpunkt nur wenig oberhalb der Atmosphärenlinie wählen dürfen, denn wenn auch das Kraftdiagramm hoch über die Atmosphärenlinie hinausgeht, so hält sich doch das Ansaugediagramm, das natürlich vom Arbeitszähler mit integriert wird, dicht zu beiden Seiten der Atmosphärenlinie.

Das *Verwendungsgebiet* solcher Arbeitszähler ist der Dauerbetrieb. Insbesondere mit Dieselmaschinen für nicht elektrischen Antrieb haben sie sich eingeführt, weil sie eine gute Kontrolle über den Brennstoffverbrauch ergeben. Voraussetzung ist immer, daß sie wirklich dauernd in Betrieb gehalten werden können. Deshalb ist eine gute Ausbildung der Schmiereinrichtungen für die laufenden Teile unerläßlich. Wir sehen in Fig. 258 eine besondere Schmierung für den Zylinder. Allerdings ist dazu die freie Beweglichkeit des Einsatzzylinders geopfert, indem er bei *d*, Fig. 259, fest aufsitzt; auch ist der Einsatz nicht mehr von Dampf umspült; man könnte Einsatz und Mantel durchbohren, doch würde dann das Passen der Löcher bei späterem Herausnehmen des Einsatzes Schwierigkeiten machen.

Man hat auch den *Arbeitszähler mit dem Indikator verbunden.* Man erspart dadurch einen Zylinder nebst Kolben und Feder. Eine solche

Verbindung ist in Fig. 263 abgebildet. Der Arbeitszähler *A* oberhalb der Indikatortrommel ist der Gümbelsche. Die Bewegung der Kraftscheibe von der Indikatorkolbenstange aus erfolgt durch eine Schwinge *S*. Der Indikator selbst ist derjenige von Lehmann, Fig. 206, S. 257. Die Trommel hat die aus Fig. 214, S. 262 bekannte Anhaltevorrichtung, die konstruktiv etwas abgeändert ist, indem die Anhalteschraube *T* der Fig. 214 zu einem großen Ring erweitert ist, der den Arbeitszähler umfaßt. Da man das Papier nicht mehr von oben auf die Trommel schieben könnte, so sind zum Festhalten desselben exzentrisch gelagerte Rollen vorhanden (Fig. 263) statt der üblichen Federn.

Fig. 264 zeigt einen Arbeitszähler, der an den gewöhnlichen Indikator Fig. 198 angesetzt werden kann: der Teil 1, 2, 3 kann bei 1 mit dem Zylinderdeckel verbunden werden, bei 2 führt er sich mit einem Stift am Trommelsteg, und bei 3 trägt er den Arbeitszähler. Die Kraftscheibe samt dem Gehäuse des Zählwerks bewegt sich dann auf der Stirnfläche der Trommel als der Wegscheibe, die Ablesung erfolgt auf der Oberseite des Zählers, der durch Federkraft an die Trommel gezogen wird, zum Aufspannen von Diagrammen aber abgeklappt werden kann (gestrichelte Stellung).

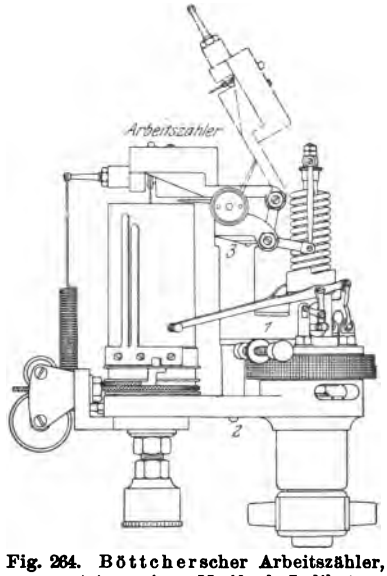


Fig. 264. Böttcherscher Arbeitszähler, angesetzt an einen Maihak-Indikator nach Fig. 198.

Wenn wir im allgemeinen die Verwendung von Anhalteeinrichtungen nicht sonderlich empfahlen, da sie oft Not machen und da man bei einiger Übung gut ohne sie auskommt, so ist doch hervorzuheben, daß in Verbindung mit Arbeitszählern eine Anhalteeinrichtung für die Trommel sehr am Platze ist. Denn ohnedies muß man beim Aufspannen eines Blattes jedesmal auch den Arbeitszähler mit anhalten, wodurch die Zählung unterbrochen wird. Im allgemeinen aber wird man sagen können, daß das Nehmen von Einzeldiagrammen und das fortlaufende Zählen der Arbeit nicht gut zueinander passende Funktionen sind, die man daher recht zweckmäßig auf zwei verschiedene Instrumente verteilt. Mit Hilfe eines Doppelhahns kann man ja gleichwohl beide Instrumente, die dann aber unabhängig voneinander sind, zugleich benutzen. Natürlich muß eine Trommel, wenn sie schon einmal zum Zählen der Arbeit mitbenutzt wird, mit einer Schmiervorrichtung versehen werden, die sich an anderen Trommeln durchaus erübrigt.

XI. Messung der Temperatur.

97. Einheit. Man mißt die Temperatur nach *Graden*. Die Größe des Grades wird festgelegt, indem man als 100° den Temperaturunterschied vom Gefrierpunkt des Wassers bis zu seinem Siedepunkt bei 760 mm Barometerstand bezeichnet. Diese Größe des Grades ist der *Celsiusskala* und der *absoluten Temperaturskala* gemeinsam. Doch beginnt die Celsiusskala vom Frierpunkt des Wassers als Nullpunkt an zu zählen, so daß also der normale Siedepunkt bei 100° C liegt; Temperaturen unter dem Frierpunkt des Wassers werden als negativ gekennzeichnet. Die absolute Temperaturskala hat ihren Nullpunkt bei —273° C, der Frierpunkt des Wassers liegt also bei 273° abs. und der normale Siedepunkt bei 373° abs. Negative Werte der absoluten Temperatur kommen nicht in Frage, da bei —273° C die theoretische untere Grenze der gesamten Temperaturskala liegt. Man pflegt die in Celsiusgraden ausgedrückte Temperatur mit t, die in absoluten Graden ausgedrückte mit T zu bezeichnen; dann ist also $T = 273 + t$.

Nun ist aber noch nicht der Grad selbst definiert, sondern nur sein Hundertfaches. Es fragt sich, wie man die Unterteilung in 100 Teile bewirken will.

Wir dürfen das gewöhnliche und auch das Luftthermometer als bekannt voraussetzen. Bei letzterem dient die Ausdehnung der Luft als Maß für die Temperaturerhöhung. Markieren wir an einem Quecksilber- und einem Luftthermometer den Gefrier- und den Siedepunkt und teilen jedesmal den Abstand in 100 gleiche Teile, so gehen beide Instrumente bei den genannten Festpunkten überein; aber bei Zwischentemperaturen machen sie voneinander abweichende Angaben. Alle Substanzen nämlich dehnen sich nicht genau proportional der Temperaturänderung aus; das Gesetz, nach dem die Ausdehnung sich vollzieht, ist bei verschiedenen Substanzen ein verschiedenes. So zeigt denn ein Quecksilberthermometer aus Jenaer Normalglas (Nr. 16^{III}) auf 50,11°, wenn das Luftthermometer 50° angibt. Für andere Temperaturen ergeben sich folgende Unterschiede[1]) bei

$t_{16^{III}} =$	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300 °C
$t_{16^{III}} - t_{Luft} =$	0	+0,083	+0,110	+0,096	+0,054	0	—0,098	+0,038	+0,632	+1,91°

Der Verlauf von 0° bis 100° ist in Fig. 265 dargestellt. Das für hochgradige Thermometer benutzte schwer schmelzbare Jenaer Borosilikatglas Nr. 59^{III} gibt zwischen 0° und 100° nur etwa $^1/_2$ bis $^1/_4$ so große Abweichungen wie das Normalglas, doch werden bei hohen Temperaturen gerade für dieses Glas die Unterschiede gegen das Luftthermometer bedeutend; der Unterschied ist nämlich

t_{Luft}	0°	100°	200°	300°	400°	500° C
$t_{59^{III}} - t_{Luft}$	0°	0°	+0,4°	+4,1°	+12,3°	+27,8°.

Ein gleichmäßig geteiltes Quecksilberthermometer zeigt also auf 527,8°,

[1]) Winkelmann, Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. III, S. 141.

wo ein Luftthermometer nur 500° anzeigt. Doch sind die Quecksilberthermometer meist nicht gleichförmig geteilt.

Ursprünglich wurde das Quecksilberthermometer der Celsiusskala zugrunde gelegt. Als man auf die besprochenen Unterschiede stieß, bedachte man, daß kein Grund vorliege, gerade die Ausdehnung des Quecksilbers als normal anzusehen, zumal ja auch noch die Ausdehnung des Glases mit ihren Zufälligkeiten Einfluß übt. Eine bessere Grundlage schien die Ausdehnung der Gase zu bilden; dehnen sich doch alle Gase etwa gleich viel, um $^1/_{273}$ ihres Volumens bei 0°, aus. Und wo die allerfeinsten Unterschiede zu beachten waren, da schien der Wasserstoff, der sich nach den Lehren der Wärmetheorie am meisten einem idealen vollkommenen Gase nähert, diejenige Gasart zu sein, deren Ausdehnung nicht zufällig ist, sondern ein Gesetz verkörpert.

Von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt werden Thermometer meist nach der *Wasserstoffskala* geeicht. Tabellenwerke legen gelegentlich das Quecksilberthermometer zugrunde. Die Unterschiede brauchen bei mäßigen Temperaturen technisch selten beachtet zu werden, wohl aber bei hohen. Der krasseste Fall bei niederen Temperaturen wäre folgender: An einem Kondensator fließe Wasser mit 8° zu und mit 20° ab; Temperaturzunahme 12°; diese sei mit einem nach der Wasserstoffskala geteilten Insrument ermittelt. Mit einem einfachen Quecksilberthermometer hätte man (Fig. 265) 8,04° und 20,08° abgelesen, also eine Temperaturzunahme um 12,04° gefunden. Der Unterschied von 0,04° ist $^1/_3$% der Temperaturzunahme. Man begeht einen Fehler von $^1/_3$%, wenn man nach der Wasserstoffskala abliest, aber für die weitere Auswertung Tabellen für die spezifische Wärme oder dergleichen benutzt, denen die Quecksilberskala zugrunde liegt.

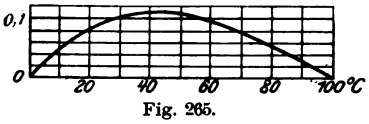


Fig. 265.
Unterschiede $t_{16^{III}} - t_{Luft}$ des Quecksilberthermometers gegen das Luftthermometer.

Durch Einführung der Wasserstoffskala als Normalie ist auch eine Schwierigkeit beseitigt: die Celsiusskala ist zunächst nur für die Temperaturen von 0° bis 100° gemacht. Man setzt aber die Teilung nach beiden Seiten gleichmäßig fort. Beim Quecksilber ist das nur möglich abwärts nahe bis zum Gefrierpunkt des Quecksilbers, aufwärts bis zu seinem Siedepunkt oder bei den sogleich zu besprechenden Instrumenten mit Stickstoffüllung bis 550° C. Über diese Grenzen hinaus hätte dann die Celsiusskala gar keinen Sinn mehr. Für das Wasserstoffthermometer gibt es nach oben hin keine theoretische Grenze, nach unten hin liegt sie beim Siedepunkt des Wasserstoffs, also so tief, daß sie praktisch nicht in Betracht kommt.

Praktisch kommt natürlich nie die Verwendung des Wasserstoffthermometers selbst in Frage, aber die benutzten Instrumente können nach der Wasserstoffskala geteilt oder geeicht sein.

98. Ausdehnungsthermometer. Das *Quecksilberthermometer*, bestehend aus der Kugel und dem Faden, neben letzterem die Skala, ist

bekannt. Thermometer bestehen heute meist aus Jenaer Glas, kenntlich an einem eingeschmolzenen roten Streifen, und zwar meist aus Normalglas 16^{III}, das sich durch geringe thermische Nachwirkungen auszeichnet. Das den Faden enthaltende flache Glasrohr pflegt oben noch eine Erweiterung zu haben, in die das Quecksilber beim Überschreiten der Höchsttemperatur eintritt, sonst müßte das Instrument zerspringen. Nicht selten bleibt in dieser Erweiterung etwas Quecksilber zurück; da das die Ablesung fälscht, so achte man darauf, daß kein Quecksilber in der Erweiterung steht; eventuell lasse man durch Erwärmen ein beträchtliches Ende des Fadens in die Kapillare treten, reiße ihn durch Schleudern vom Quecksilbervorrat ab, damit sich das in der Erweiterung stehende mit ihm vereinigt, und bringe das Ganze durch Schleudern wieder zur Kugel zurück. Manchmal hilft auch vorsichtiges Erwärmen der oberen Erweiterung des Thermometers, so daß das Quecksilber in die Röhre getrieben wird. Ist das Quecksilber unrein oder das Thermometer schlecht entlüftet, so teilt es sich leicht auch in der Röhre selbst; man schwenke dann das Thermometer, die Kugel nach außen, im Kreise, so daß die Schwungkraft das abgerissene Quecksilber zum übrigen treibt, oder schlage die Hand mit dem Thermometer darin auf den Tisch. Wenn später das Abreißen wieder und wieder an gleicher Stelle erfolgt, so kühle man das Thermometer mit Eis oder Ätherwatte so weit ab, daß der Faden ganz in die Kugel hineintritt; dann vereinigt sich alles Quecksilber.

Thermometer werden mit verschiedenem Skalenbereich geliefert; oft gehen sie von —10° bis +110° oder noch weiter hinauf, andererseits gibt es aneinanderschließende Sätze: 0° bis 40°, 35° bis 70°, 70° bis 110°. Je enger der Meßbereich, desto weiter wird die Skala und desto genauer, freilich nur in geübter Hand, die Ablesung, aber desto weniger verwendbar ist das Instrument. Will man übrigens ein Thermometer für höhere Temperaturen verwenden, als ihm zukommen, so kann man durch Schwenken etwas Quecksilber in die eben besprochene Erweiterung bringen und das Instrument so benützen, muß aber durch Vergleich mit einem anderen Thermometer feststellen, wieviel Grade man jeder Ablesung zuzuzählen hat.

Das gewöhnliche Quecksilberthermometer bleibt bis etwa 300° anwendbar, passende Skala vorausgesetzt. Bei 360° siedet das Quecksilber. Das zu hindern, füllt man den Raum über dem Quecksilber, der gewöhnlich luftleer ist, mit Stickstoff oder Kohlonsäure von etwa 10 at Spannung. Das Instrument ist nun bis 500°, bei Verwendung besonderer Glassorten sogar vorübergehend bis 575°, verwendbar, das heißt bis das Glas erweicht, das übrigens genügend starkwandig sein muß. Der oft zu hörende Name *Stickstofffthermometer* ist selbst dann nicht sehr charakteristisch, wenn der obere Raum wirklich mit Stickstoff gefüllt ist: das Wirksame ist immer noch das Quecksilber.

In Wechselstromfeldern geben Quecksilberinstrumente der Wirbelströme wegen falsche Werte.

Weingeistthermometer sind insofern schlechter als Quecksilberinstrumente, als der Weingeist das Glasrohr innen benetzt, daher etwas daran hängenbleibt. Für *niedrige Temperaturen*, unter —10°, sind sie

aber vorzuziehen, weil Quecksilber zähe zu werden beginnt; mit leicht siedendem Petroläther hat man bis —180° messen können.

Thermometer zeigen richtig, wenn auch der ganze Faden die zu messende Temperatur hat. Taucht nur die Kugel in den Raum ein, und hat der Faden eine andere Temperatur, so hat man eine Korrektion anzubringen, die man *Fadenkorrektion* nennt.

Es könnte einfacher scheinen, gleich beim Eichen den Faden herausschauen zu lassen, um die Korrektion zu umgehen. Da aber die Temperatur der umgebenden Luft, die ja die Fadentemperatur zu sein pflegt, wechselt, so ist diese Vereinfachung nicht angängig. Nur Thermometer für hohe Temperaturen, über 200° etwa, sind bisweilen „mit herausragendem Faden" geeicht und dann so bezeichnet; zweckmäßig sollte noch die Eintauchlänge numerisch angegeben sein. Gegenüber den hohen Temperaturen spielen die kleinen Schwankungen der Lufttemperatur keine Rolle. Nun muß aber der ganze Faden herausschauen, und das ist auch oft unbequem.

Bezeichnen wir mit α den Ausdehnungskoeffzienten des Quecksilbers, so dehnt sich also ein Faden von 1 cm Länge um α cm, wenn wir ihn um 1° erwärmen. Statt des Zentimeters können wir auch die Länge eines Grades der Thermometerskala zugrunde legen und sagen, der Faden von 1° Länge dehne sich um α°. Nur müssen wir jetzt, weil ja die Gradteilung selbst sich ausdehnt, unter α den scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers in Glas verstehen; für das übliche Jenaer Glas ist $\alpha = \frac{1}{6300}$. Machen wir nun die Ablesung t_0 am Thermometer, während der um n Grade herausragende Faden die Temperatur t_f hat, so ist die wahre Temperatur der Thermometerkugel $t = t_0 + \frac{n \cdot (t - t_f)}{6300}$, oder auch, weil t und t_0 nicht viel voneinander verschieden ist, t aber erst gesucht wird,

$$t = t_0 + \frac{n \cdot (t_0 - t_f)}{6300}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der zweite Summand dieser Formel ist die Fadenkorrektion. Man mißt die Fadentemperatur durch ein Hilfsthermometer, dessen Kugel in halber Höhe des Fadens hängt — oder schätzt sie.

Um welche Beträge es sich bei der Fadenkorrektion handelt, geht aus folgenden beiden Beispielen hervor: Sei die Temperatur von Essengasen zu messen; wir haben 324° abgelesen, dabei schaute der Faden von 150° an heraus und seine Temperatur sei mit 32° gemessen oder geschätzt. Die Fadenkorrektion beträgt also $\frac{(324 - 150) \cdot (324 - 32)}{6300}$ $= 8{,}06 \backsim 8°$; die wahre Temperatur ist 332° statt 324°. Wollten wir die Wärmeverluste feststellen, die daher rühren, daß die Essengase mit mehr als 20° C abgehen, so hätten wir durch Unterlassung der Korrektion einen Fehler von $\frac{8}{332 - 20} \cdot 100 = 2{,}6\%$ erhalten. — Selbst

bei geringen Temperaturen sind die Fehler nicht belanglos. An einem Oberflächenkondensator oder Vorwärmer lasen wir die Zulauftemperatur des Wassers 10,6°, die Ablauftemperatur 39,7° ab, würden also eine Temperaturzunahme von 29,1° feststellen. Im Raum herrscht aber die Temperatur 27°, und das sei auch die Temperatur der Fäden, die beide von —10° an herausragen. Die Fadenkorrektionen sind: für den Zulauf —0,053° (negativ!) und für den Ablauf +0,091°. Beachten wir sie, so wird die Temperaturzunahme des Wassers um 0,053 + 0,099 oder um fast 0,15° größer; der Fehler durch ihre Nichtbeachtung ist $\frac{0{,}15}{29{,}1} \cdot 100 \backsim 0{,}5\%$. Wenn man solche Korrektionen vorzunehmen als zu umständlich erachtet, darf man wenigstens nicht das Resultat auf sehr viele Stellen angeben. — Das einfachste ist, darauf zu achten, daß beide Quecksilberfäden um gleich viele Grade herausragen und gleiche Temperatur haben, dann wird der Unterschied der Temperaturen richtig.

Außer der Fadenkorrektion wäre noch eine *Skalenkorrektion* zu machen, wenn die Skala aus anderem Material ist als das Thermometergefäß, und wenn Faden und Skala eine andere Temperatur haben als bei der Eichung. Bei Temperaturen bis zu 100° beträgt (für Messingskala) diese Korrektion nicht über $^1/_{40}°$. Für genaue Messungen und für höhere Temperaturen wird man sie am besten umgehen durch Verwendung von *Stabthermometern*, die die Skala auf dem dicken Thermometerrohr aufgeätzt tragen.

Thermometer brauchen wegen der merklichen Wärmekapazität der Quecksilbermasse eine gewisse Zeit, um genügend genau die Temperatur der Umgebung anzunehmen. Die *Dauer der Einstellung* ist namentlich dann bedeutend, wenn die Umgebung ruhende Luft mit ihrer schlechten Leitfähigkeit und geringen Kapazität ist; die Temperaturänderung der Quecksilberkugel kann dann nur nach Maßgabe der Luftkonvektion erfolgen. Man steigere also künstlich die Konvektion, indem man das Thermometer bewegt oder im Kreise schleudert. Wo die Luft sich bewegt, ist die Konvektion ohne weiteres vorhanden. Man vergleiche auch die Konstruktion des Psychrometers, § 106.

Zu beachten sind ferner die *Einflüsse der Strahlung*. Wenn die Wandungen des Raumes die gleiche Temperatur haben, nähert sich die des Quecksilbers asymptotisch der gemeinsamen Temperatur der Wandungen und des zwischenliegenden Mediums. Haben die Wandungen eine andere Temperatur, so wird sich die Temperatur der Quecksilberkugel und daher die Anzeige des Instruments einstellen als Gleichgewichtszustand, hervorgehend aus den Einflüssen der Wärmeleitung (der Konvektion) des umgebenden Mediums einerseits, aus den Einflüssen der Bestrahlung durch die Wandung andererseits. Die Ablesung wird also jedenfalls zwischen den beiden Umgebungstemperaturen liegen — welcher näher, das hängt von der gegenseitigen Größe von Strahlung und Konvektion ab. Im allgemeinen will man die Temperatur des (strömenden oder ruhenden) Mediums kennen. Die Verhältnisse liegen dann insofern nicht gerade ungünstig, als die blanke

Quecksilberkugel gegen Strahlung weniger empfänglich ist als manche der sogleich zu beschreibenden Instrumente. Immerhin hat man auf die Strahlung zu achten und die Kugel vor ihr durch Abschirmen zu schützen. Beim Messen in einer Dampfleitung wird man richtiger messen, wenn die Leitung außen isoliert ist, also die Wandung sehr genau die Dampftemperatur hat. Bei Wasser wird wegen der guten Konvektion der Einfluß der Strahlung geringer sein.

Der *Einfluß der Ableitung* ist wegen der schlechten Leitfähigkeit des Glases bei Quecksilberthermometern an sich gering; die Ableitung gewinnt Einfluß beim Einbau des Instruments in einen ölgefüllten Stutzen. (Siehe hierüber S. 328 und 329.)

99. Elektrische Temperaturmessung. *Widerstandsthermometer* benutzen zur Temperaturmessung die Tatsache, daß der elektrische Widerstand der meisten Metalle mit der Temperatur zunimmt. Wenn daher in einer Wheatstoneschen Brücke die vier Widerstände so abgeglichen sind, daß in kaltem Zustande die Brücke stromlos bleibt, so wird Strom durch die Brücke gehen, sobald einer der Zweige auf eine abweichende — zu messende — Temperatur gebracht wird. Die Ablesung der Temperatur kann nun entweder durch Beobachtung des durch die Brücke gehenden Stromes an einem Galvanometer geschehen, oder aber man kann einen anderen der Zweigwiderstände so lange ändern, bis die Brücke wieder stromlos ist, worauf man aus der Größe des eingeschalteten Widerstandes auf die Temperatur schließt. In beiden Fällen wird natürlich das Galvanometer oder der Widerstand unmittelbar mit einer Temperaturskala versehen. Bei der ersten Art der Ablesung ist auch die Stärke der Stromquelle von Einfluß, bei der zweiten nicht; dagegen ist die Bedienung des Widerstandshebels zeitraubend. Verwendet man im zweiten Falle statt eines Galvanometers ein in die Brücke geschaltetes Telephon, so wird man auf Änderungen der Temperatur nicht ohne weiteres aufmerksam.

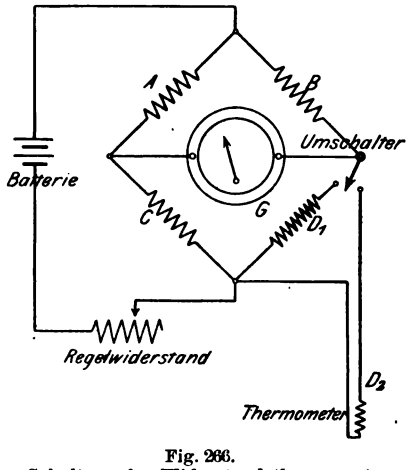


Fig. 266.
Schaltung für Widerstandsthermometer.

Fig. 266 zeigt eine für Widerstandsthermometer mit direkter Galvanometerablesung brauchbare Schaltung. Um zunächst dem Strom die richtige Stärke zu geben, kann man mittels eines Umschalters den Hilfswiderstand D_1 in den vierten Zweig der Brückenanordnung schalten; der Regelwiderstand ist dann so nachzustellen, daß das Galvanometer seinen größten Ausschlag macht. Nachdem so die Spannung eingestellt ist, wird durch Bedienung des Umschalters das Thermometer mit der Spule D_2 an Stelle von D_1 eingeschaltet, und nun kann man die Tem-

peratur am Galvanometer G ablesen; der Regelwiderstand darf natürlich nicht mehr verstellt werden. Als Stromquelle dient eine Batterie von zwei Akkumulatoren; man kann aber auch an ein Beleuchtungsnetz anschließen, wozu noch ein besonderer Abzweigwiderstand nötig ist. Auch wird die Einrichtung so geliefert, daß der Umschalter einen weiteren Kontakt für einen anderen Meßbereich hat, etwa so, daß eine Skala des Galvanometers von 0° bis 300°, eine andere von 300° bis 600° reicht; der Umschalter müßte dann, wenn die niedere Skala gelten soll, einen Vorschaltwiderstand vor das Thermometer legen. Sämtliche Teile sind bei stationären Anlagen an einem Schaltbrett, meist noch mit Umschaltvorrichtung für mehrere Meßstellen, oder in einem Kasten transportabel, montiert; in letzterem Fall ist das Thermometer selbst an einer Leitungsschnur hängend herausnehmbar. Das Thermometer (Fig. 267) besteht aus einer Spule aus reinem Platin, einem sehr unveränderlichen Metall, in einer Hülle aus Quarzglas, daß heißt geblasenem Quarz, der sich vor Glas durch Unempfindlichkeit gegen Temperaturstöße auszeichnet: man kann das glühende Thermometer in kaltes Wasser tun, ohne daß es springt. Das Quarz ist eng auf die Spule aufgeschmolzen, um die Wärmeübertragung zu sichern, also die Trägheit zu vermindern. Das Thermometer wird nach Bedarf mit einer langen Eisenfassung versehen.

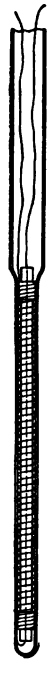


Fig. 267. Widerstandsthermometer.

Quecksilberthermometer sind, wie erwähnt, bis zu 575° anwendbar, Widerstandsthermometer lassen sich bis zu etwa 900° benutzen.

Noch weiter hinaus lassen sich die *thermoelektrischen Meßmethoden* anwenden, die jedoch auch schon bei niederen Temperaturen nicht ungern verwendet werden, namentlich auf der Reise, weil sie die lästige Batterie und den Regelwiderstand vermeiden, während sie vor den Quecksilberthermometern den Vorteil haben, daß man die Ablesung an beliebigem Ort fern der Meßstelle machen kann, namentlich auch mehrere Ablesungen an einem Ort.

Soweit die thermoelektrischen und andere Geräte zur Messung besonders hoher Temperaturen dienen, bezeichnet man sie als *Pyrometer*.

Für Untersuchungszwecke technischer Art ist das *Pyrometer von Le Chatelier* vielfach gebräuchlich. Sein wirksamer Teil ist ein Thermoelement, gebildet aus zwei Drähten von etwa 0,6 mm Durchmesser, die miteinander in einer Kugel verschmolzen sind, der eine aus Platin, der andere aus einer Platinrhodiumlegierung mit 10% Rhodium. Statt Platinrhodium wird wohl auch Platiniridium oder ähnliches verwendet. Leider ist es nicht angängig, das Thermoelement direkt der zu messenden Temperatur auszusetzen. Es muß mit einer Porzellanhülle versehen werden, weil Kohlenoxyd, das ja meist in den zu untersuchenden Gasen ist oder doch zeitweise darin sein kann, die Platinrhodiumlegierung und damit die elektromotorische Kraft verändert. Die Not-

wendigkeit der Umhüllung ist deshalb oft bedauernswert, weil ohne sie die Trägheit geringer wäre. Das Pyrometer ist also (Fig. 268) ein stabförmiger Körper mit zwei Polklemmen; in ihm laufen die beiden Drähte entlang. Einer der Drähte ist behufs Isolation mit einem engen Porzellanrohr umhüllt; beide sind dann in ein weiteres Porzellanrohr gesteckt, das vorne geschlossen ist und 1600° aushält. Will man nun das Ganze gegen Stöße sichern, so versieht man es mit einem äußeren Eisenmantel; dann ist es nur bis etwa 1000° brauchbar. Statt Porzellan verwendet man, namentlich für Instrumente, die dauernd im Feuer liegen, Fassungen aus Marquardtscher Masse, einem Material, das bestem Schamotte an Feuerfestigkeit wesentlich überlegen ist. Im Gebrauch schmilzt gelegentlich die Schweißstelle der beiden Drähte fort; man kann die Enden einfach wieder umeinander wickeln. Nur wird dadurch das Pyrometer allmählich kürzer.

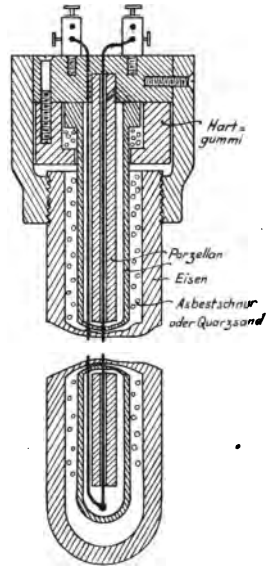


Fig. 268.
Le-Chatelier-Pyrometer von Keiser & Schmidt.

Fig. 269 zeigt, daß die von solchem Element entwickelte elektromotorische Kraft einigermaßen proportional der an der Lötstelle vorhandenen Temperatur ist. Ein zugehöriges Galvanometer läßt direkt Grade ablesen. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Enden der wirksamen Platindrähte, das heißt die Stellen, wo sie in Kupfer übergehen, auf 0°C gehalten werden. Statt dessen genügt es, die Fig. 269 einfach auf die Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen zu beziehen: dazu ist die Skala des Galvanometers verstellbar, und man stellt sie vor Beginn des Versuches so ein, daß sie Raumtemperatur zeigt, wenn das Thermoelement einfach im Raume liegt.

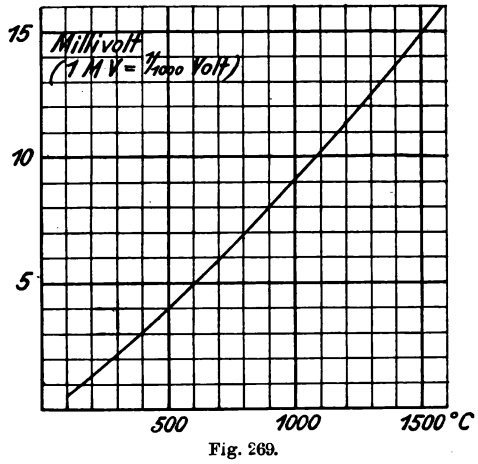


Fig. 269.
EMK des Le-Chatelier-Elementes, abhängig von der Temperaturdifferenz.

Le-Chatelier-Instrumente werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geprüft und beglaubigt. Nach Versuchen, die das Institut mit diesen Pyrometern vornahm, ist die Angabe verschiedener Instrumente gut miteinander vergleichbar; bei einer Temperatur von 1000° C beträgt die Unsicherheit etwa $\pm 5°$. Eines beachte man indessen: Die Angaben der Reichsanstalt, die jedem Instrument beizuliegen pflegen, geben die elektromo-

torische Kraft des Elementes. Ein angeschlossenes Millivoltmeter mißt die Klemmenspannung an seinen eigenen Klemmen, die um den Spannungsabfall im Element und in den Zuleitungen geringer ist als erstere. Der Spannungsabfall hat die Größe $J \cdot W$, worin J die Stromstärke und W der innere Widerstand des Elementes ist; da nun J vom äußeren Widerstand, das heißt, dem des Galvanometers abhängt, so wird auch die Klemmenspannung des Elementes eine verschiedene sein, je nach dem angewendeten Galvanometer. Deshalb kann die Reichsanstalt ihre Angabe nur in der erwähnten Form machen, und man hat je nach dem angewendeten Galvanometer eine Umrechnung vorzunehmen, die eine einfache Anwendung des Ohmschen Gesetzes ist. Kennt man die Widerstände von Element und Galvanometer, so ermittelt man am besten ein für allemal die für diese Kombination charakteristische Beziehung zwischen Galvanometerangabe und Temperatur. Meist hat das Galvanometer schon die entsprechende Temperaturskala, oder die liefernde Firma gibt sie an. Wechselt man aber das Galvanometer aus oder hat man sehr lange Leitungen zwischen Element und Galvanometer, so kann man durch Nichtbeachtung des Gesagten Fehler begehen.

Für Messung geringerer Temperaturen sind die Le-Chatelier-Instrumente weniger geeignet, weil die Messung der schwachen Ströme allzu empfindliche Galvanometer verlangt. Für geringere Temperaturen werden Thermoelemente, so Silber-Konstantan- und Kupfer-Konstantan-Elemente benutzt; diese sind billiger und bei niedrigen Temperaturen empfindlicher, jedoch nach der Natur der Materialien weniger unveränderlich in ihren Angaben als die mit Edelmetallen arbeitenden. Man kann sie nach Bedarf leicht selbst herstellen und eichen. Folgende Tabelle gibt einen Anhalt dafür, auf welche elektromotorischen Kräfte man bei Anwendung verschiedener Metalle rechnen kann. Die Angaben beziehen sich auf 100° Temperaturunterschied der beiden Lötstellen.

	brauchbar bis	Thermokraft in MV für 100°
Eisen-Konstantan	800°	4,9 bis 5,4
Kupfer-Konstantan	800°	4,1
Eisen-Nickel	—	3,0 bis 3.5
Kupfer-Nickel	—	2,3
Platin-Platin mit 10% Rhodium . .	1600°	0.8 bis 1,0 (vgl. Fig. 269)

Wegen der großen Unterschiede, die schon geringe Verunreinigungen im Gefolge haben, können die Zahlen nur als Anhalt dienen, und eine Eichung ist unumgänglich.

Für die Messung der entstehenden elektromotorischen Kräfte dienen empfindliche Millivoltmeter, deren Skala z. B. beim Lechatelier-Instrument nur bis zu 16 MV gehen muß.

Bei Anwendung der elektrischen Meßmethoden zu *feineren Temperaturmessungen* ist zu beachten, daß der Widerstand der Kupferleitungen von ihrer Temperatur abhängt, und daß an jeder Stelle, wo verschiedene Metalle in der Leitung aneinandergrenzen, eine thermoelektrische Kraft wach wird, die nur dann unschädlich ist, wenn sie durch eine gleiche

umgekehrten Vorzeichens aufgehoben wird. Man muß also insbesondere für gleiche und für bekannte Temperatur der Verbindungsstelle des Elementes mit der Leitung sorgen, und hat diese Stelle deshalb wohl in einen Wassermantel gelegt; Bestrahlung derselben ist zu vermeiden. Selbst die Ungleichheiten verschiedener Kupfersorten können zu Störungen führen.

Die Hauptfehlerquelle bei elektrischen und namentlich bei thermoelektrischen Temperaturmessungen ist indessen die *Ableitung*. Voraussetzung für richtige Messung der Temperatur des umgebenden Mittels ist natürlich, daß der ganze Widerstandsdraht bzw. daß die Lötstelle des Thermoelementes diese Temperatur annimmt. Ist nun auch der *Einfluß der Strahlung* — der natürlich an den Aufnahmeorganen der elektrischen Meßeinrichtungen ebenso wirksam sein kann wie bei Thermometern, S. 320 — durch passende Anordnung ausgeschaltet, so wird die Temperatur der Meßorgane sich einstellen als Ausgleichzustand zwischen der Wärmezuführung aus dem zu messenden Mittel und der Wärmeabführung durch die zum Galvanometer führenden Drähte, bei Messung von Temperaturen unter der der Umgebung umgekehrt. Um wieviel die Temperatur des Aufnahmeorgans von der Umgebungstemperatur abweicht, hängt einerseits von Größe und Aufnahmefähigkeit der Oberfläche, andererseits von Größe und elektrischer Leitfähigkeit des Querschnitts ab sowie davon, wie weit die Wärme im Querschnitt wandern muß, um auf wärmeabgebende Flächen zu treffen. Das Verhältnis des Querschnitts zur Oberfläche wird um so günstiger — für die Ableitung ungünstiger —, je kleiner der Drahtdurchmesser ist. Außerdem ist natürlich Kupfer und Silber hinsichtlich der Ableitung ungünstiger als alle anderen Metalle. Über die Anordnung aber läßt sich sagen, es sei nötig, die Zuleitung über eine gewisse Strecke hin — die z. B. für starken Kupferdraht größer sein muß als für andere — innerhalb des Mittels fortzuführen. Man darf also Thermoelemente nicht zu kurz in das Medium eintauchen lassen, oder man muß die Elementendrähte genügend lang isoliert führen.

Wie die innen liegende (als warm angenommene) Lötstelle eine Ableitung erfährt, so erfährt die außen liegende Übergangsstelle zur Kupferfortleitung eine Erwärmung durch die Elementdrähte hindurch. Man muß also die Leitungen genügend lang aus Material der Elementendrähte fortführen.

Vor den eigentlichen Thermometern haben die elektrischen Methoden der Temperaturmessung den Fortfall der Fadenkorrektion und das voraus, daß man die Ablesung in einiger, ja beliebiger Entfernung vom Orte, dessen Temperatur festzustellen ist, machen kann. Man kann also die Ablesungen mehrerer Temperaturen an einer Stelle machen und erspart die Wege etwa zu schwer zugänglichen Rohrleitungen. Auch Registrierung der Galvanometerangaben ist möglich. Endlich ist es möglich, thermoelektrische und Widerstandsthermometer mit sehr feinen Drähten (0,02 mm) auszustatten und dadurch ihre Trägheit aufs äußerste zu beschränken. Vgl. Z. d. V. D. I. 1914, S. 603.

100. Betriebsinstrumente. Während die bisher besprochenen Instrumente hohen Anforderungen an Genauigkeit entsprechen, aber den Nachteil haben, zu sehr von sorgsamer Behandlung abhängig oder zu

zerbrechlich zu sein, sollen die folgenden Instrumente für Betriebe verwendet werden, wo sie roher Behandlung ausgesetzt sind, wo dafür aber eine nur mäßige Genauigkeit ganz ausreichend ist.

Graphitpyrometer (Fig. 270) bestehen aus einem Graphitstab, der in eine Eisenhülle eingeschlossen und nur an einem Ende mit ihr verbunden ist. Unter dem Einfluß höherer Temperaturen dehnt sich die Eisenhülle in der Länge aus, während Graphit die Eigenschaft hat, kaum mit der Temperatur die Länge zu ändern. Daher entsteht eine Relativbewegung der beiden freien Enden gegeneinander, die man für eine Zeigerbewegung ausnutzen kann: ein Gehäuse mit Skala sitzt auf dem Eisenrohr, während der Zeiger mit dem Graphitstab in Verbindung steht. — *Metallthermometer* nutzen die verschiedene Ausdehnung zweier Metalle zur Messung aus. — Es ist natürlich, daß bei solchen Instrumenten die ganze Länge der messenden Stäbe der Temperatur ausgesetzt sein muß. Auch muß die Masse der Stäbe erst durchwärmt werden; daher zeigen sie erst nach längerer Zeit an: sie sind sehr träge.

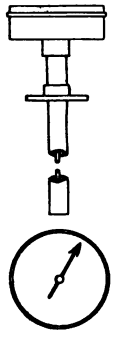


Fig. 270. Graphit- oder Metallthermometer.

Thalpotasimeter nutzen die Tatsache, daß bei siedenden Flüssigkeiten eine eindeutige Beziehung zwischen Spannung und Temperatur besteht, zur Temperaturmessung aus. Wenn ein eisernes Thermometergefäß teilweise mit Äther gefüllt ist, so wird ein Manometer, das man durch Kapillarrohr damit verbindet, direkt in Grade Celsius geteilt werden können. Dabei wird das Kapillarrohr und das Federrohr des Manometers mit flüssigem Äther sich anfüllen, welcher dorthin als nach dem kälteren Teil destilliert. Es muß dann so viel Äther im Gefäß zurückgeblieben sein, daß bei allen Temperaturen noch Flüssigkeit vorhanden ist und die Dämpfe gesättigt sind. — Das Thalpotasimeter ist theoretisch inkorrekt, weil es vom äußeren Luftdruck abhängig ist und bei wechselndem Barometerstand verschiedene Angaben macht. Die zu messende Temperatur legt ja die absolute Spannung im Thermometergefäß fest, das Manometer aber zeigt nicht absoluten, sondern Überdruck an. Das kann gelegentlich selbst bei roheren Messungen merkliche Fehler ergeben. Instrumente mit Ätherfüllung können etwa von 50° (nicht weniger) bis 180° benutzt werden. Von 360° bis zur Rotglut (650°) hat man entsprechende Instrumente mit Quecksilberfüllung, in denen der Quecksilberdampf die gleiche Rolle spielt wie sonst der Ätherdampf.

In den *Quecksilberdruckthermometern* ist Quecksilber so in einen genügend widerstandsfähigen Behälter eingeschlossen, daß es denselben ganz ausfüllt unter Vermeidung jedes Luftraumes. Da also bei einer Erwärmung das Quecksilber an freier Ausdehnung gehindert wird, so entsteht eine Spannung, die als Maß für die Temperatur an einem Manometer abgelesen wird; das Manometer ist empirisch in Grade Celsius geteilt. Den stählernen Quecksilberbehälter kann man mit dem Manometer durch ein längeres Kapillarrohr verbinden und so die Vorrichtung zum Übertragen des Ergebnisses bis auf etwa 50 m Entfernung benutzen. Es treten dann Verhältnisse auf ähnlich denen, die beim ge-

wöhnlichen Quecksilberthermometer die Notwendigkeit einer Fadenkorrektion ergeben. Das Quecksilber in Kapillarrohr und Manometerfeder, dessen Menge man freilich möglichst klein hält, stört, indem seine Temperatur — die Temperatur der Umgebung — die Messung beeinflußt. Eine Korrektion ist aber nicht so leicht zu machen wie beim gewöhnlichen Thermometer. — Diese Thermometer sind von —20° bis +350° brauchbar, so weit etwa, wie das Quecksilber flüssig ist.

Äußerlich stellen sich Thalpotasimeter und Quecksilberdruckthermometer als ein einhüllendes Eisenrohr dar, das in einen Flansch oder dergleichen endet; auf der anderen Seite des Flansches ist ein Manometer (ähnlich wie Fig. 270).

Die in der Tonindustrie üblichen *Segerschen Kegel* sind dreiseitige abgestumpfte Pyramiden aus Tonerdesilikaten, die je nach ihrer Zusammensetzung bei verschiedenen Temperaturen zu schmelzen beginnen. Sie werden in 58 Nummern hergestellt; die ihrer Nummer entsprechende Temperatur gilt als erreicht, wenn der Kegel so weit zusammengefallen ist, daß die Spitze des Kegels die Unterlage berührt. Daß dies nicht nur von der Endtemperatur, sondern auch von der Dauer der Einwirkung abhängt, entspricht den Bedürfnissen der keramischen Industrie.

101. Strahlungspyrometer nutzen die Tatsache aus, daß die Strahlung eines Körpers mit der Temperatur rasch zunimmt. Im allgemeinen allerdings hängt sie auch noch von den Eigenschaften des Körpers ab; für den sogenannten absolut schwarzen Körper indessen gelten theoretisch das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz, das den Gesamtbetrag der Strahlung, und das Wiensche Verschiebungsgesetz, das die Verteilung der Strahlung auf die sichtbaren und unsichtbaren Teile des Spektrums festlegt. Nun kann man allseits umschlossene Hohlräume als absolut schwarze Körper betrachten, und daher aus der von einem Feuerraum ausgesandten Strahlung auf die absolute Temperatur des Feuers schließen; diese zu bestimmen ist die Aufgabe der Strahlungspyrometer, und sie sind hierfür um so unersetzlicher, als die Temperaturen leicht noch über das hinausgehen, was das Le-Chatelier-Instrument mißt (1600°), und weil sie nicht das Einbringen eines Instrumentes in den Feuerraum erfordern, in dem es leicht Stößen durch Kohlen oder das zu erwärmende Gut ausgesetzt ist.

Ein Fernrohr wird auf die Stelle des Feuerraumes gerichtet, deren Temperatur man messen will, und die Helligkeit des Gesichtsfeldes mit der Helligkeit einer Glühlampe oder einer durch Glühlampe beleuchteten Fläche in Übereinstimmung gebracht, indem entweder die Helligkeit der Glühlampe durch Vorschaltwiderstände, oder die Helligkeit des Gesichtsfeldes durch Vorschieben abgestimmter Gläser geändert wird; aus der Stellung des Widerstandes oder der Gläser kann man die Temperatur erkennen; die Glühlampe muß natürlich mit bestimmter Helligkeit brennen. In dieser Weise findet die Messung bei den *optischen Pyrometern* von Holborn-Kurlbaum und Wanner statt. Während also diese Instrumente auf die helle (optische) Strahlung ansprechen, gegebenenfalls auch nur auf bestimmte durch ein farbiges Glas ausgewählte Strahlenarten, so reagieren andere Instrumente auf die Gesamt-

strahlung. Die von dem Feuerraum ausgesandte Wärme- (und Licht-) Strahlen werden durch einen Hohlspiegel auf eine Stelle konzentriert, und die dort entstehende Temperatur wird durch ein Thermoelement oder durch ein Widerstandsthermometer gemessen (Pyrometer von Féry). — Die Strahlungspyrometer sind nach oben hin bis zu beliebigen Temperaturen verwendbar. Unten beginnt der Meßbereich der optischen Pyrometer bei etwa 650° — mit dem Einsetzen der Rotglut.

Wegen aller Einzelheiten sei auf das im Literaturverzeichnis genannte Werk von Burgess und Le Chatelier verwiesen.

102. Eichung und Anbringung der Thermometer. Gewöhnliche Thermometer haben, hauptsächlich wegen der ungleichen Weite der Glasröhre, ungleichmäßige Teilung, oder vielmehr die gleichmäßig hergestellte Teilung bedarf einer Korrektion. Man muß die Thermometer eichen durch Vergleich mit einem guten Normalthermometer. Normalthermometer pflegen mit einem Prüfungsschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt versehen zu sein.

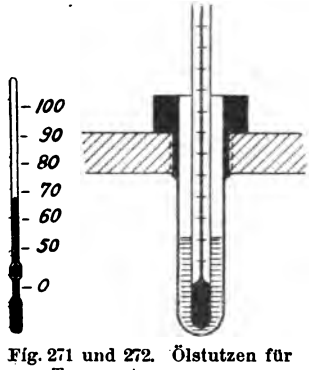


Fig. 271 und 272. Ölstutzen für Temperaturmessung.

Das Eichen der Gebrauchsthermometer geschieht, indem man ein Wasserbad auf verschiedene, beliebige Temperaturen bringt und die beiden zu vergleichenden Instrumente hineinhält. Das ist für feine Instrumente weniger einfach als es klingt: es sind Strömungen von verschiedener Temperatur in jedem Wasserbade. Man muß gut umrühren, beide Kugeln hart aneinander und namentlich in gleicher Höhe halten, und mehrere Ablesungspaare machen, um das Mittel nehmen zu können. Bei Temperaturen über 100° muß man Öl, weiterhin geschmolzenen Salpeter, schließlich geschmolzenes Blei nehmen, bei Temperaturen unter 0° bereitet man Kältemischungen aus Eis und Kochsalz oder Rhodanammonium. Eichungen unter 0° erfordern die meiste Übung. Die Kugeln müssen in Flüssigkeit tauchen, nicht in Luft zwischen den Eisstücken sich befinden.

Das Nachprüfen der Festpunkte ist für den Frierpunkt einfach, man bringt das Instrument in das Schmelzwasser von reinem Eis. Schnee ist selten rein. Zum Nachprüfen des Siedepunktes bringt man das Thermometer in den Dampf siedenden Wassers, nicht etwa in das Wasser selbst. Dazu kann man den Siedeapparat benutzen, den wir auf S. 70, Fig. 53, als Mittel zur Bestimmung des Barometerstandes besprachen. Die Festpunkte pflegen durch Marken auf dem Rohr selbst festgelegt zu sein, für den Fall, daß die Skala sich verschiebt. Auch wo die Skala gar nicht bis zu dem betreffenden Festpunkt reicht, sind diese Marken oft dennoch vorhanden. Dazu ist das Rohr erweitert und nachher, an der Stelle des Festpunktes, wieder verengt (Fig. 271).

Thalpotasimeter und dergleichen Instrumente vergleicht man ebenfalls von Zeit zu Zeit mit geprüften Glasthermometern. Ihr Zeiger pflegt

nachstellbar zu sein, so daß man ihn, etwa in siedendem Wasser, zum richtigen Anzeigen bringen kann. —

Wo man die Temperatur von Flüssigkeiten, Gasen oder Dämpfen in Rohrleitungen zu messen hat, kann man oft das Thermometer nicht ohne weiteres einführen. Es bleibt dann ein Notbehelf gegenüber der direkten Einführung, die stets besser ist, wenn man einen *Stutzen* nach Fig. 272 in das Rohr einsetzt (in senkrechte Rohre schräg), in den Stutzen Öl füllt und nun das Thermometer ins Öl taucht. Bei Verwendung von Quecksilber statt Öl darf der Stutzen nicht aus Messing sein; bei höheren Temperaturen bedeckt man Quecksilber mit einer Schicht Öl, um Verdunsten zu verhüten.

Zu beachten bleibt die *Ableitung*, die der Ölinhalt des Stutzens in die Rohrwand hinein und weiter in die Umgebung erfährt, so daß bei höheren Temperaturen nicht die volle Temperatur an das Thermometer kommt. Man sollte das ganze Rohr in der Nähe des Stutzens gut isolieren. Noch weniger gut ist bloßes Anlegen des Thermometers, unter Umwickeln mit Kupferdraht zwecks besserer Leitung, und Isolieren des ganzen. Man kann wohl so ermitteln, wann das betreffende Rohr wärmer oder kälter wird; eine Messung der Temperatur findet nur mangelhaft statt (3 bis 5° zu wenig bei 100°).

Das beste bleibt, wie gesagt, direktes Einführen der Kugel. Wenn man das Thermometer, etwas mit Öl bestrichen, durch einen Gummistopfen steckt, so haftet es nach einigen Tagen so fest darin, daß man es nur noch unter Preisgabe des Stopfens losbekäme. Stopfen mit Thermometer kann man nun in ein Loch der Rohrleitung stecken und durch Festbinden vor Herausschleudern sichern. Das geht selbst bei ziemlich hohen Spannungen. Man kann auch das Thermometer in besondere Fassungen bringen, die es durch eine Stopfbüchse hindurchgehen lassen und gegen Herausschleudern sichern. Nur platzt das Glas bei plötzlichen Temperaturänderungen, in Dampf namentlich dann, wenn Wassertropfen dagegen spritzen; in dieser Hinsicht sind, wie schon erwähnt, die Quarzglasausdehnungs- und Widerstandsthermometer vorzüglich.

Durch Anwendung eines Ölstutzens wird auch die Trägheit des Thermometers erhöht; es folgt Temperaturschwankungen langsamer; das ist selten erwünscht, oft freilich gleichgültig.

Besondere Vorsicht muß man bei der Anbringung der Thermometer an Kanälen anwenden, in denen *Saugspannung* herrscht, etwa am *Fuchs von Schornsteinen*. Man muß nämlich für sehr gute Abdichtung an der Einführungsstelle sorgen, wozu nach Bedarf Putzwolle, Lehm, Kitt, Gummi dienen kann; bei ungenügender Abdichtung wird ein Strom von Umgebungstemperatur durch die Öffnung eingesaugt werden, und wenn er gerade die Thermometerkugel — bei Thermoelementen die Lötstelle — trifft, so können ganz falsche Ergebnisse die Folge sein. Wo an Kesselzügen oder am Fuchs eine Doppelwand mit Isolierung durch Schlacke zwischen beiden Mauerteilen vorhanden ist, hat die Abdichtung im inneren Mauerteil zu geschehen; sonst würde Luft durch die Schlackenschicht angesaugt werden, da das äußere Mauerwerk doch undicht ist, und ähnliche

Störungen würden die Folge sein. Wo ein Eisenrohr durch das Mauerwerk geführt wird, zur Armierung der Bohrung, da ist nicht nur das Thermometer im Rohr, sondern auch dieses gegen das Mauerwerk, und zwar gegebenenfalls immer im inneren Mauerwerkskörper, abzudichten. Und schließlich sind grobe anderweite Undichtheiten im (inneren) Mauerwerkskörper stets so weit zu beseitigen, daß nicht irgendein Strom äußerer Luft in unkontrollierbarer Weise bis gegen das Aufnahmeorgan der Temperaturmeßeinrichtung gelangen kann.

Um die Temperatur fester Körper zu messen — etwa die Erwärmung eines Lagers, eines Elektromotors nach längerem Laufen — ist es das beste, Quecksilber in ein besonders gebohrtes Loch zu füllen und das Thermometer hineinzusenken. Sonst umwickelt man auch wohl die Thermometerkugel mit Stanniol, legt sie an die zu untersuchende Stelle und bedeckt sie gut mit Watte.

XII. Messung der Wärmemenge.

103. Ermittlung der Wärmemenge aus der Temperaturerhöhung. Wärmemengen mißt man an der Temperaturerhöhung, die sie einem Körper, dem Wärmeträger, erteilen oder aus der Temperaturerniedrigung, die ein Wärmeträger bei Entziehung der Wärmemenge erfährt. Hat sich der Wärmeträger vom Gewicht G und der spezifischen Wärme c von t_1 auf t_2 erwärmt, so ist die ihm zugeführte Wärmemenge

$$Q = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

und die gleiche Wärmemenge hat er bei der Abkühlung von t_2 auf t_1 abgegeben.

Bequem ist es oft, mit dem *Wärmeinhalt* eines Körpers zu rechnen; als Wärmeinhalt bei $t°$ bezeichnet man die Wärmemenge, die man dem Körper zur Erwärmung von der Normaltemperatur 0° C auf $t°$ zuzuführen hat. Da bei t_1 der Wärmeinhalt $G \cdot c \cdot t_1$, bei t_2 aber $G \cdot c \cdot t_2$ wäre, so kann man sagen: die einem Körper zur Erwärmung von t_1 auf t_2 zugeführte Wärmemenge ist gleich dem Unterschied der Wärmeinhalte bei diesen beiden Temperaturen. Daß sich bei negativen Temperaturen auch negative Wärmeinhalte ergeben, ist rein formal und beruht auf der willkürlichen Annahme von 0° C als Anfang der Temperaturskala.

Man kann statt des Gewichts auch das Volumen einführen, muß dann aber auch die spezifische Wärme auf das Volumen bezogen annehmen. Es wäre das reduzierte Volumen zu nehmen. Die Rechnungsweise ist bei zweiatomigen Gasen bequem, weil diese alle, auf das Volumen bezogen, gleiche spezifische Wärme haben.

Voraussetzung ist, daß keine Änderung des Aggregatzustandes statthat, sonst treten die in § 106 und 107 zu besprechenden Verhältnisse ein. Auch ist Konstanz der spezifischen Wärme anzunehmen oder sonst mit einer mittleren spezifischen Wärme zu rechnen.

Die spezifische Wärme, soeben mit c bezeichnet, ist eine Eigenschaft des betreffenden Materials, die man Tabellenwerken entnimmt. Man kann sie bestimmen, indem man einer bekannten Gewichtsmenge des Materials eine bekannte Energiemenge am einfachsten in Form elektrischen Stromes zuführt, die Temperaturerhöhung von t_1 auf t_2 beobachtet und von der Beziehung (S. 203) Gebrauch macht, daß 1 Watt = 0,000 2387 WE/sek ist. So erhielte man die *mittlere spezifische Wärme* zwischen den Temperaturen t_1 und t_2; man könnte nicht erkennen, ob von t_1 bis t_2 Proportionalität zwischen zugeführten Wärmemengen und Temperaturerhöhungen statthat. Ginge man schrittweise vor, indem man mehrere kleinere Wärmemengen zuführt und nach der Anfangstemperatur t_1 die weiteren t', t'', endlich wieder t_2 beobachtet, so könnte man schon mehrere mittlere spezifische Wärmen, nämlich zwischen t_1 und t', t' und t'', t'' und t_2, berechnen und etwa konstatieren, daß die spezifische Wärme mit wachsender Temperatur etwas zunimmt. Je kleiner man die Beobachtungsintervalle nimmt, desto klarer tritt solche Veränderlichkeit hervor: als *wahre spezifische Wärme* bei der Temperatur t bezeichnet man den Quotienten aus einer unendlich kleinen Wärmemenge und der durch sie bewirkten Temperaturzunahme: $c_t = \frac{dQ}{dt}$. Mit genügender Annäherung pflegt man als wahre spezifische Wärme die Wärmemenge einzuführen, die eine Temperaturerhöhung um 1°, von t auf $t + 1$, bewirkt.

Kennt man nur den Verlauf der wahren spezifischen Wärme, so hat man zur Berechnung der einer Temperaturerhöhung von t_1 auf t_2 entsprechenden Wärmemenge die mittlere spezifische Wärme $c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c_t \cdot dt$ zu bilden; das geschieht am einfachsten graphisch durch Auftragen der Beziehung zwischen c und t und durch Planimetrieren der entstehenden Fläche; solange die spezifische Wärme linear von der Temperatur abhängt, ist die mittlere spezifische Wärme von t_1 bis t_2 gleich der wahren spezifischen Wärme bei der mittleren Temperatur $\frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_2)$.

104. Wärmeeinheit. Spezifische Wärme des Wassers. Die Einheit der Wärmemenge ist die *Kalorie*, das ist die Wärmemenge, die 1 kg Wasser um 1° C erwärmt. Man nennt sie auch kurzweg Wärmeeinheit (WE), was ja allerdings keine Benennung, sondern ein Gattungsbegriff ist. Bezieht man die Rechnung nicht auf 1 kg, sondern auf 1 g so erhält man das Resultat in kleinen Wärmeeinheiten oder Grammkalorien. Es ist offenbar 1 WE = 1000 gr cal.

Man erhält verschiedene Wärmeeinheiten, je nachdem man die Erwärmung von 0° auf 1° (*Nullpunktskalorie*) oder von $14^1/_2$° auf $15^1/_2$° (15°-Kalorie) als maßgebend ansieht oder aber ob man als Wärmeeinheit den hundertsten Teil der zur Erwärmung von 0° auf 100° nötigen Wärmemenge bezeichnet (*mittlere Kalorie*). Wäre die spezifische Wärme des Wassers die gleiche bei allen Temperaturen, so bestände

kein Unterschied zwischen den verschiedenen Wärmeeinheiten. Die spezifische Wärme des Wassers ist aber von der Temperatur abhängig, also sind die Wärmeeinheiten voneinander verschieden. Da das Gesetz, nach dem die Änderung der spezifischen Wärme vor sich geht, nicht sehr genau bekannt ist, so ist das Verhältnis der verschiedenen Wärmeeinheiten zueinander entsprechend unsicher.

Die wahre spezifische Wärme des Wassers — deren Begriff dadurch bestimmt ist, daß gleichen Wärmemengen gleiche Mengen mechanischer und elektrischer Energie entsprechen müssen — fällt von 0° an zunächst etwas und erreicht bei etwa 30° einen Mindestwert, der um etwa 1% kleiner ist als der bei 0°; über 30° nimmt sie wieder zu und scheint bei 60° so groß wie bei 0° und bei 100° zwischen 2 und 4% größer zu sein.

Liegt nun auch der Verlauf im einzelnen nicht sehr sicher fest, so scheint doch festzustehen, daß die mittlere spezifische Wärme von 0° bis 100° ziemlich genau so groß ist wie die wahre bei 15°, während die wahre spezifische Wärme bei 0° um etwa 1% größer ist als jene beiden. Daraus würde folgen

$$1\ \mathrm{WE}_{15} : 1\ \mathrm{WE}_{0,100} : 1\ \mathrm{WE}_{0} = 1{,}0 : 1{,}0 : 1{,}01.$$

Diese Zahlen werden deshalb gegeben, weil in Tabellenwerken gelegentlich jede dieser Einheiten zu finden ist: die 15°-Kalorie bei Angaben, die bei Zimmertemperatur erhalten wurden (Mischungskalorimeter), die mittlere Kalorie bei Angaben nach dem Bunsenschen Eiskalorimeter; endlich sind ältere Angaben oft in Nullpunktskalorien umgerechnet (allerdings mit wechselndem Umrechnungsverhältnis).

Es wird gut sein, bei dieser Gelegenheit zu bemerken, daß die heute üblichste Angabe des mechanischen Wärmeäquivalents, nämlich

$$1\ \mathrm{WE}_{15} = 427\ \mathrm{m \cdot kg},$$

sich auf die 15°-Kalorie bezieht. Sein Wert ist übrigens von der Erdbeschleunigung abhängig; so ist der wahrscheinlichste Wert ($\pm 0{,}2\%$ Genauigkeit)

in Berlin $(g = 9{,}813\ \mathrm{m/sek^2})$: $1\ \mathrm{WE}_{15} = 426{,}9\ \mathrm{m \cdot kg}$,
in München $(g = 9{,}806\ \mathrm{m/sek^2})$: $1\ \mathrm{WE}_{15} = 427{,}2\ \mathrm{m \cdot kg}$.

Alle diese Angaben[1]) beziehen sich auf die Wasserstoffskala (S. 317).

Mit Rücksicht auf die Unsicherheit, die in bezug auf die spezifische Wärme des Wassers oberhalb 30° noch besteht, ist es freilich berechtigt, kurzerhand die spezifische Wärme des Wassers bei Messungen der Wärmemenge als konstant anzusehen und gleich eins zu setzen. Doch muß man im Gedächtnis behalten, daß alle Ergebnisse mit einer Unsicherheit von etwa 1% behaftet sind — und dies zu zeigen war der Zweck der vorhergehenden Zeilen.

Wenn man kalorimetrische Messungen so ausführt, daß bei mehreren Versuchen die Kalorimeterflüssigkeit etwa dieselben Anfangs- und Endtemperaturen hat, wird die relative Genauigkeit eine größere.

[1]) Scheel und Luther, Referat für den Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen, abgedruckt in: Verhandl. d. Dtsch. Physik. Ges. 1908, S. 584.

Nebenbei sei bemerkt, daß man der spezifischen Wärme, die meist einfach als Zahl angegeben wird, die Benennung $\frac{\text{WE}}{°\text{C} \cdot \text{kg}}$ oder $\frac{\text{WE}}{°\text{C} \cdot \text{cbm}}$ im technischen Maßsystem geben sollte.

Im englischen Maßsystem ist die Einheit der Wärmemenge (British Thermal Unit, abgekürzt BTU) diejenige, die 1 engl. Pfund Wasser um 1° Fahrenheit erwärmt. Es ist 1 BTU = 0,253 WE = 253 gr cal.

105. Ausführung der Messung. Es sind allgemein zwei Arten der Messung denkbar. Man kann sie an einem ruhenden oder doch nur durch Umrühren bewegten Wärmeträger vornehmen, der dann mehr und mehr erwärmt beziehungsweise abgekühlt wird; man bezeichnet solche Messung als Anwärmungs- oder Abkühlungsversuch. Man kann aber auch im Beharrungszustand arbeiten, indem man die Wärme auf einen fließenden Wärmeträger überträgt, dessen sekundlich ausgewechselte Menge man mißt und für den man den Temperaturunterschied zwischen Zu- und Ablauf mißt. Für die erste Art ist das Bombenkalorimeter (S. 351), für die zweite das Junkers-Kalorimeter (S. 361) ein Beispiel; als Beispiel für die zweite ist auch anzuführen, daß man die Verluste mit den Auspuffgasen einer Gasmaschine bestimmt hat, indem man deren Wärme in einem Röhrensystem nach Art des Oberflächenkondensators kontinuierlich auf Wasser übertrug; jeder Oberflächenkondensator einer Dampfmaschine ist ein Kalorimeter im großen. Beide Arten der Messung werden endlich an Kältemaschinen verwendet, wie das bald an Beispielen besprochen werden soll.

Beide Arten der Messung erfordern eine Reihe von Berichtigungen. In jedem Fall kann der *Wärmeaustausch mit der Umgebung* Einfluß haben; ob er freilich zu einer Berichtigung Anlaß geben soll, hängt vom Zweck des Versuches ab; ist zum Beispiel zu prüfen, ob eine Heizvorrichtung imstande ist, einer bestimmten Flüssigkeitsmenge in vorgeschriebener Zeit eine gewisse Wärmemenge zuzuführen, so wird sie das im allgemeinen trotz der äußeren Verluste tun müssen. Außerdem ist bei Erwärmungs- und Abkühlungsversuchen zu bedenken, daß die umgebende Gefäßwand an der Temperaturveränderung ganz oder teilweise teilnimmt, und daß ihre Wärmeaufnahme oder -abgabe zu berücksichtigen ist. Dabei darf man für Metallwände im allgemeinen annehmen, daß sie jede Temperaturänderung sehr schnell mitmachen; anders freilich bei Isolierungen, bei denen nur die nächstliegenden Schichten das tun werden, während es lange dauert, bis auch die ferner liegenden sich erwärmen oder abkühlen.

Beispiel: An einer Kühlanlage wurde ein *Abkühlungsversuch* gemacht. Während die Sole nicht umlief, sondern nur mittels Rührwerkes bewegt wurde, wurde das Abfallen der Temperatur beobachtet; nach Feststellung gleichmäßigen Abfalles durch Auftragen der Temperatur als Funktion der Zeit wurde graphisch der Teil der Abfallkurve herausgeschnitten, der gerade Interesse bot: Zum Herunterdrücken von —2,0 auf —6,0° waren 61 min nötig gewesen; dem entspricht ein Temperaturabfall von 3,93° pro Stunde. Durch Ausmessen des Verdampfers wurde das Volumen bei —5° zu 3,18 cbm bestimmt;

das spezifische Gewicht der Magnesiumchloridlösung wurde zu 1,092 bei +15° C mittels Aräometers gemessen, das sind also 1092 kg/cbm; die Tabellen von Landolt und Börnstein geben hiernach einen Salzgehalt von 10,7% der Lösung, und hierfür eine spezifische Wärme 0,845 WE/kg. Der Temperaturunterschied von +15° gegen —5° bedingt einen Unterschied der spezifischen Gewichte von 0,3% (es ist $\gamma_{15} : \gamma_{-5} = 1{,}003$), also wird das Solegewicht zu $3{,}18 \cdot 1{,}003 \cdot 1092 = 3490$ kg anzusetzen sein. — Außer dieser Sohle wurde auch das Eisen des Behälters, soweit es unterhalb des Solespiegels lag, und es wurden auch die kupfernen Kühlschlangen abgekühlt. Aus der Werkzeichnung ergibt sich das Gewicht der Eisenteile zu rund 800 kg, das der Kupferteile zu rund 160 kg; die spezifischen Wärmen sind zu 0,114 und 0,093 anzunehmen.

Man berechnet nun zweckmäßig zunächst den *Wasserwert* der abgekühlten Teile, das heißt dasjenige Wassergewicht, das bei der Abkühlung um 1° ebensoviel Wärme hergibt wie die in Rede stehenden. Der Wasserwert läßt sich unter Benutzung der angegebenen Zahlen wie folgt berechnen:

Sole	3490 kg · 0,845 =	2948 kg
Eisenteile	800 kg · 0,114 =	91 kg
Kupferteile	160 kg · 0,093 =	15 kg
Gesamter Wasserwert der gekühlten Teile		3054 kg

Da, wie erwähnt, diese Teile um stündlich 3,93° gekühlt wurden, so war die Leistung der Kälteanlage $3054 \cdot 3{,}93 = 12\,000$ WE/st.

Von einer Berücksichtigung dessen, was die Isolierung des Behälters und manche andere Teile an Wärme hergegeben hatten, wurde abgesehen, weil die Bestimmung schwierig ist; jedenfalls wird also die Kälteleistung etwas zu niedrig bestimmt sein. Die Strahlungseinflüsse blieben unbeachtet, weil es sich um die Erledigung der Frage handelte, ob die Anlage die Höchstleistung hergebe, und weil im praktischen Betrieb der Anlage die Strahlung in gleicher Größe auftreten wird.

An einer anderen Kühlanlage wurde ein *Versuch im Beharrungszustand* gemacht. Die kalte Sole wurde, so wie es ihre Bestimmung ist, in die zu kühlenden Räume geschickt; sie kam etwas erwärmt aus ihnen zurück. Dabei wurde die Leistung der Anlage durch Beeinflussung der Umlaufzahl des Kompressors so eingeregelt, daß gerade der Kältebedarf der Kühlräume gedeckt wurde, so daß also die abgehende Sole wieder auf die gleiche niedrigere Temperatur kam: es wurde der Beharrungszustand der Anlage erstrebt. Während der dreistündigen Versuchsdauer floß im Mittel die Sole mit —7,21° zu den Kühlräumen und kam mit —5,17° aus ihnen zurück; sie kühlte sich also um 2,04° ab. Mittels Ausflußöffnungen (§ 59) wurde die Solemenge zu 5,19 ltr/sek = 18 680 ltr/st gemessen. Spezifisches Gewicht der Kochsalzlösung 1,133 bei 18°, entsprechend 1,143 bei —5° und entsprechend einer spezifischen Wärme von 0,824 WE/kg. Die Kälteleistung ist $18\,680 \cdot 1{,}143 \cdot 0{,}824 \cdot 2{,}04 = 35\,830$ WE/st. — Nun war aber noch eine Berichtigung für mangelhaften Beharrungszustand anzubringen; die

Temperatur des Soleinhaltes war nämlich am Schluß des Versuches 0,2° höher gewesen als anfangs. Die Korrektion ist so zu berechnen wie der Abkühlungsversuch; der Wasserwert des Soleinhaltes einschließlich der Eisen- und Kupferteile war 8600 kg, also waren $8600 \cdot 0{,}2 = 1720$ WE Kälte dadurch hergegeben worden, jedoch in drei Stunden. Die Kälteleistung der Anlage war also um $1720 : 3 = 570$ WE/st geringer gewesen und hatte 35 260 WE/st betragen. — Eine weitere Berichtigung war in diesem Fall für den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu machen; es handelte sich nämlich um eine Untersuchung nicht der ganzen Anlage, sondern eines neuen Kompressors, der für die vielleicht schlechte Isolierung des Verdampfers nicht verantwortlich gemacht werden durfte. Man ließ nach Abstellen des Kompressors und des Soleumlaufs in den zu kühlenden Räumen nur das Rührwerk weiterlaufen, um gleichmäßige Temperatur im Verdampfer zu haben, und beobachtete im Verlauf von 10 st einen Temperaturanstieg von —7,3 auf —4,9°, also um stündlich 0,24° bei $-\frac{1}{2} \cdot (7{,}3 + 4{,}9) = -6{,}1°$ mittlerer Temperatur. Raumtemperatur etwa +10°, so daß bei —7,21° auf $0{,}24 \cdot \frac{17{,}21}{16{,}1} = 0{,}26°$ stündlicher Wärmeeinstrahlung zu rechnen ist (*Einstrahlungsversuch*). Wegen des Wasserwertes von 8600 kg ergibt sich eine Korrektion von $8600 \cdot 0{,}26 = 2240$ WE/st, und die endgültige Kälteleistung ist $35\,260 + 2240 = 37\,500$ WE/st.

Da bei dem Versuch im Beharrungszustand die Unsicherheiten wegen des Einflusses der Isolierung nur in eine Korrektion eingehen, so ist solch Versuch im allgemeinen vorzuziehen — nicht nur bei Kühlanlagen. Wo man die Kälte nicht in Kühlräumen verwenden kann, muß man sie durch Dampf vernichten; wenn man diesen in Schlangen kondensiert, so hat man aus seinem Gewicht eine nochmalige Bestimmung der Kälteleistung (§ 107).

106. Wärmemengen in Luft. Luftfeuchtigkeit. Wo der Wärmeträger nicht, wie in den eben besprochenen Beispielen, eine Flüssigkeit ist, sondern Luft, da werden die Verhältnisse nur dann andere, wenn sich der Dampfgehalt der Luft bei dem Erwärmungs- oder Abkühlungsvorgang verändert, indem der Luft entweder Feuchtigkeit durch Verdampfen oder Verdunsten zugeführt wird, oder aber indem sich Feuchtigkeit an den kühlenden Wänden niederschlägt, weil dort der Taupunkt unterschritten ist.

Bei niederer Lufttemperatur und normalem Luftdruck ist der Wassergehalt der Luft nur gering. Er beträgt bei 20° Lufttemperatur nur 17,3 g/cbm im gesättigten Zustand, gegenüber 1205 g/cbm Gewicht der Luft. Ist nun auch die spezifische Wärme des Wasserdampfes (etwa 0,5 Kal/kg) rund doppelt so groß wie die der Luft (0,24 Kal/kg), so bleibt doch wegen des niedrigen Gewichtsanteiles der Luft der Fehler klein, den man begeht, wenn man die gesamte Luft einfach als Luft behandelt und den Wasserdampfgehalt unbeachtet läßt, solange nur die spezifische Wärme in Frage kommt. Die Unsicherheiten in der Messung der Luftmengen sind jedenfalls stets erheblich größer.

Anders sobald bei Verdunstungs- oder Kondensationsvorgängen die latente Wärme des Wasserdampfes ins Spiel kommt. Dann darf der damit verbundene Wärmeumsatz keinesfalls vernachlässigt werden.

Das Verhalten der Luftfeuchtigkeit folgt aus dem Daltonschen Gesetz, wonach sich der Wasserdampf im lufterfüllten Raum so verhält, als sei Luft nicht anwesend. Demnach kann der Teildruck des Dampfes in der Luft höchstens den Sättigungsdruck erreichen, der der gerade herrschenden Temperatur nach der Spannungskurve des Wasserdampfes zugeordnet ist. Der Teildruck das Dampfes kann aber auch kleiner sein, der Dampf ist dann überhitzt. Als *relativen Feuchtigkeitsgehalt* bezeichnet man das Verhältnis des wirklich herrschenden Dampfteildruckes zu dem aus der Spannungskurve des Wasserdampfes folgenden Sättigungsdruck; der relative Feuchtigkeitsgehalt wird in Bruchteilen der Einheit oder in Prozenten angegeben.

Der gerade herrschende Dampfteildruck läßt sich experimentell bestimmen, indem man unter einer Glasglocke ein gewisses Quantum der Luft dicht absperrt unter Beifügung von etwas Chlorkalzium, und indem man an einem miteingelegten Barometer beobachtet, wieviel der Druck sich vermindert. Die Feuchtigkeit wird nämlich vom Chlorkalzium absorbiert, d. h. der Dampfdruck beseitigt, genauer gesagt, bis auf den sehr kleinen Wert des Gleichgewichtsdruckes gegen Chlorkalzium vermindert. Was das Barometer nach Beendigung des Absorptionsvorganges anzeigt, ist der reine Luftdruck.

Für die technischen Zwecke der Wärmemessung kommt es auf den *absoluten Feuchtigkeitsgehalt* der Luft dem Gewicht nach an. Im gesättigten Zustand kann bei bestimmter Temperatur und dem ihr zugeordneten Sättigungsdruck eine bestimmte Sättigungsmenge im Kubikmeter Raumes sich aufhalten, die so groß ist, wie wenn Luft nicht anwesend wäre. Im ungesättigten Zustand ist weniger Feuchtigkeit im Kubikmeter enthalten, und zwar ist sehr näherungsweise der relative Feuchtigkeitsgehalt auch wieder durch das Verhältnis der wirklich vorhandenen Dampfmenge zur Sättigungsmenge gegeben, oder auch sehr näherungsweise folgt der wirkliche Feuchtigkeitsgehalt als Produkt aus dem Sättigungsgehalt und der relativen Feuchtigkeit.

Die Messung des Dampfteildruckes durch Absorption mit Chlorkalzium unter einer Glocke ist nicht die übliche Methode. Man bestimmt gelegentlich die Feuchtigkeit mittels des bekannten *Haarhygrometers*, das unmittelbar den relativen Feuchtigkeitsgehalt, jedoch meist recht ungenau, angibt; immerhin genügen Haarhygrometer für manche betriebstechnische Zwecke. Für eigentliche Versuchszwecke kommt mehr die Verwendung des *Psychrometers* in Frage, das namentlich für meteorologische Zwecke ausgebildet worden ist. Der wirksame Teil sind zwei gut übereinstimmende Thermometer. Das eine ist mit einem Mullbausch umwickelt, der vor der Ablesung angefeuchtet wird, das andere behält die blanke Kugel. Infolge der Verdunstungskälte zeigt das feuchte Thermometer weniger als das trockene, der Unterschied beider, die psychometrische Differenz, wird um so größer, je trockener die Luft ist, je energischer also die Luft Feuchtigkeit aus dem Mullbausch aufnimmt.

Die entstehende psychometrische Differenz ist indessen wesentlich abhängig von dem Maße der Konvektion in der Nähe der Thermometer. Stagniert die Luft am feuchten Thermometer, so stellt sich bald hinsichtlich der Feuchtigkeit eine Art Sättigungszustand ein, während doch von der Umgebung her Wärme zugeführt wird. Die psychrometrische Differenz kommt daher in voller Größe nicht zustande, wenn man in ruhender Luft das Psychrometer still hält.

Bei der Messung in den Kanälen von Lüftungs- und Kühlanlagen wird wegen der Wirbelung des Luftstromes selbst die Konvektion häufig ausreichen. In jedem Fall aber ist es sicherer und bei Untersuchung von Raumluft unbedingt erforderlich, künstlich für Konvektion der Luft an beiden Thermometern zu sorgen. Dazu werden beide Thermometer in einem einfachen Blechgestell gemeinsam befestigt und an einem Faden im Kreise herumgeschleudert (*Schleuderpsychrometer*). In engen Kanälen ist das Schleudern nicht möglich; dann muß man sich des auf alle Fälle bequemeren *Aspirations-Psychrometers* bedienen (Fig. 273 u. 274). Die beiden Thermometer, nämlich das trockene t und das feuchte f, sind in einem vernickelten Blechgehäuse so untergebracht, daß sie von Sonnen- und anderer Strahlung nicht getroffen werden können. Das Gehäuse ist zur weiteren Verminderung der Strahlung sorgfältig vernickelt, und muß gut blank gehalten werden; die Thermometerkugeln sind mit einem doppelten Blechmantel umgeben. Den Kopf des Instrumentes bildet ein kleiner Ventilator mit Federbetrieb, der Luft durch die Rohre A, B und C ansaugt, so daß sie die Kugeln der beiden Thermometer gleichmäßig umspült.

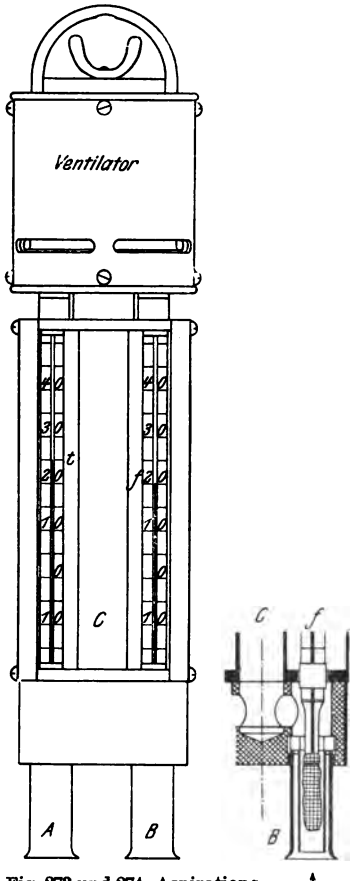


Fig. 273 und 274. Aspirations-Psychrometer von Fuess.

Um das feuchte Thermometer mit Wasser zu benetzen, dient ein Glasröhrchen mit Gummiball (Fig. 275), das wie folgt gehandhabt wird: der Gummiball ist mit Wasser gefüllt und bei D mit Hilfe einer Schlauchklemme abgeklemmt; durch Öffnen der Schlauchklemme und Druck auf den Gummiball läßt man das Wasser bis zur Marke M steigen, schließt dann die Klemme, und führt das Glasrohr in die Mündung B ein, so daß der Mullbausch des feuchten Thermometers benetzt

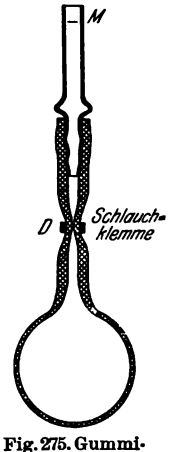


Fig. 275. Gummiball zum Anfeuchten.

wird. Dann wird das Uhrwerk aufgezogen. — Es ist wichtig, daß das trockene Thermometer wirklich trocken bleibt, deshalb darf man nicht durch Spritzen das feuchte anfeuchten. Es ist ferner wichtig, daß das verwendete Wasser rein ist; es sollte eigentlich destilliertes Wasser genommen werden. Denn der Druck des Wasserdampfes, von dem die Verdunstung abhängt, ist über Salzlösungen anders als über Wasser, meist niedriger. Dient ja die Erniedrigung des Dampfdruckes über Salzsole zum Herabsetzen der Luftfeuchtigkeit in Luftkühlanlagen mit Solerieselung.

Für die *Einführung von Psychrometern in Kanäle*, die *unter Saugspannung* stehen, gilt, was auf S. 329 über die Einführung von Thermometern gesagt worden ist. Man muß vermeiden, daß ein einwärtsgehender Luftstrom die Kugeln der Thermometer trifft, so daß dieses mehr oder weniger durch die Temperatur der Umgebung beeinflußt wird. Man muß also die Thermometer an der Einführungsstelle gut abdichten. Aspirations-Psychrometer müssen ganz in den Kanal eingehängt und innen abgelesen werden; bei engen, nicht begehbaren Kanälen (z. B. den Saugschläuchen von kleineren Kühlanlagen) kann man eine Glasscheibe in der Kanalwand anbringen, durch die hindurch man abliest. Die Einführung nur der Röhren *A*, *B* (Fig. 273) des Psychrometers genügt nur bei sehr geringem Unterdruck, denn der Ventilator der Instrumente liefert nur etwa 12 mm Unterdruck. Ist also die Saugspannung im Kanal größer, so kehrt der Luftstrom in *C* seine Richtung um und man untersucht Außenluft. Aber schon vorher verringert sich in der Umgebung der Thermometerkugeln die Luftgeschwindigkeit und damit die Konvektion.

Zur Theorie des Vorganges sei folgendes bemerkt: Die Temperatur des feuchten Thermometers sinkt bis zum Eintreten eines Beharrungszustandes; dieser kann entweder durch Erreichung des Sättigungsdruckes in der abgekühlten Luft nahe dem Thermometer, oder durch die Wärmezufuhr bedingt werden, indem die zur Verdunstung nötige Wärme der herangeführten trockneren Luft entnommen werden muß; so kann der Wärmeinhalt der feuchten aber abgekühlten Luft nicht über den der trocknen Luft herausgehen. Letztere Bedingung der Wärmezufuhr ist maßgebend, weil dieser Beharrungszustand eher erreicht wird als der andere.

Zur Auswertung der Psychrometerablesungen kann man sich hiernach einer Kurventafel bedienen, in der der Wärmeinhalt derjenigen feuchten Luftmenge, die 1 kg trockener Luft enthält, als abhängig von der Temperatur für verschiedene Feuchtigkeitsgrade aufgetragen ist (Fig. 276). Empirisch läßt sich aber auch folgende Formel daraus finden: es sei t und f die Ablesung an beiden Thermometern und p_f der zur Temperatur f gehörige Sättigungsdruck in mm QuS, dann ist der wirkliche Dampfdruck in der Luft zu berechnen aus

$$p_a = p_f - \tfrac{1}{2}\,(t - f) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2).$$

Beispiel: Wäre also am trockenen Thermometer $t = +18{,}0°$ und am feuchten $f = +12{,}0°$ abgelesen, so läßt sich errechnen: Sättigungs-

druck bei 12,0°: $p_{12} = 10{,}5$ mm QuS; also Dampfteildruck $p_d = 10{,}5 - \frac{1}{2} \cdot 6 = 7{,}5$ mm Qu S. Der Sättigungsdruck bei 18° ist $p_{18} = 15{,}5$ mm QuS; so wird die relative Feuchtigkeit $r = \frac{7{,}5}{15{,}5} = 0{,}485 = 48{,}5\%$. Die Sättigungsmenge bei 18° ist 15,4 g/cbm; also enthält die untersuchte Luft 0,485 · 15,4 = 7,45 g/cbm Feuchtigkeit. Der Luftteildruck wäre, bei 760 mm Barometerstand, 760 — 7,5 = 752,5 mm QuS.

Mit Hilfe von Fig. 276 hätte man die gleiche Auswertung machen können: bei 12° ist der Wärmeinhalt feucht gesättigter Luft 8 Kal pro 1 kg Luftgehalt. Gehen wir auf der Wagerechten 8 Kal/kg nach rechts bis zum Schnitt mit der Temperatur +18°, so ergibt sich ohne weiteres die relative Feuchtigkeit zu rund 48%.

Wo die Ablesung am feuchten Thermometer unter 0° liegt, hat man für p_f den Sättigungsdruck gegen Eis einzusetzen, es sei denn, daß das Wasser am feuchten Thermometer durch Unterkühlung nicht gefröre, was dann am glatten Durchgang des Fadens ohne Anhalten durch den Nullpunkt zu erkennen wäre.

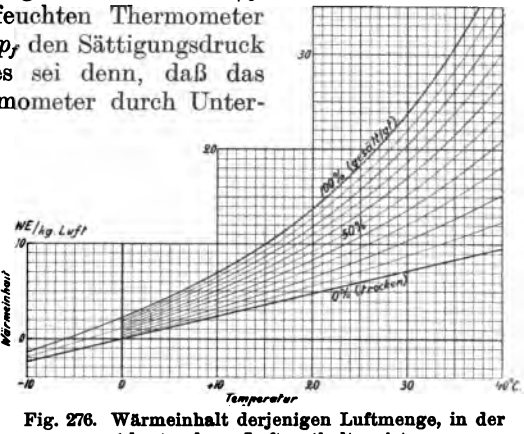


Fig. 276. Wärmeinhalt derjenigen Luftmenge, in der 1 kg trockner Luft enthalten ist.

Ein weiteres Beispiel soll, in Ergänzung der Beispiele des vorigen Paragraphen, die Messung der *Wärmeleistung des Luftkühlers einer Kühlanlage* zeigen. Die Wärme wird der Luft als Wärmeträger durch Schlangen entzogen, dabei tritt gleichzeitig eine Wärmebindung durch Kondensation ein. In Frage kommen sonst ähnliche Rechnungen und Messungen in den Befeuchtungseinrichtungen der Lüftungsanlagen für Aufenthaltsräume und Textilfabriken; nur kommt dort nicht Kondensation, sondern die Verdunstung in Frage.

In einem Luftkanal von 0,4 qm Querschnitt wurde vor dem Ventilator die Geschwindigkeit der Luft zu 11,7 m/sek bestimmt. Daraus folgt die umgewälzte Luftmenge zu 0,4 · 11,7 · 3600 = 16 900 cbm/st. Bei der Messung war die Lufttemperatur +3° C, der Barometerstand 760 mm QuS; auf 0° C bezogen sind dann 16 700 cbm/st umgewälzt worden. Die spezifische Wärme von 1 cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$ Luft ist 0,31. Die Luft hatte vor dem Ventilator +3,95° C Temperatur, hinter dem Luftkühler war ihre Temperatur —1,38° C. In dem ganzen, aus Ventilator und Luftkühler bestehenden Apparat fand eine Temperaturabnahme von 5,33° C statt, entsprechend einer Kälteleistung durch Luftkühlung 16 700 · 0,31 · 5,33 = 27 600 Kal/st.

Die Feuchtigkeit der Luft wurde zwischen dem Ventilator und dem Luftkühler gemessen. Die Temperatur der Luft betrug dort nach der

Ablesung am trockenen Thermometer des Psychrometers 4,25° C (gegen 3,95° C vor dem Ventilator). Am feuchten Thermometer wurde gleichzeitig 2,65° abgelesen, so daß also die psychrometrische Differenz 1,6° war. Dem entspricht nach Formel (2) ein Dampfteildruck von $p_d = 5{,}56 - 0{,}5 \cdot 1{,}6 = 4{,}76$ mm QuS., worin 5,56 mm nach der Dampftabelle der Sättigungsdruck des Dampfes bei 2,65° C ist. Der Sättigungsdruck bei 4,25° ist 6,21 mm QuS, also findet sich der relative Feuchtigkeitsgehalt zu 76,7%. Der Sättigungsgehalt bei +4,25° C ist 6,48 g/cbm, der Gehalt der untersuchten Luft also $0{,}767 \cdot 6{,}48 = 4{,}97$ g/cbm.

Um nun den Wasserdampfgehalt der gesamten Luftmenge zu ermitteln, haben wir zunächst noch ihr Volumen bei 4,25° C aus demjenigen bei 0° zu 16 950 cbm zu errechnen. Der Wasserdampfgehalt in der gesamten Luftmenge beim Eintritt in den Luftkühler (oder beim Eintritt in den Ventilator, indem sich mit der Temperatur wohl der relative Feuchtigkeitsgehalt, nicht aber der absolute verändert hat), ist also $16\,950 \cdot 0{,}00497 = 84{,}2$ kg/st.

Dieser in den Luftkühler eintretenden Feuchtigkeitsmenge ist die aus ihm austretende gegenüberzustellen. Am Austritt wurden —1,38° C gemessen; eine psychrometrische Differenz war nicht zu konstatieren; obwohl an sich nicht unbedingt Sättigung hinter dem Luftkühler herrschen muß, wenigstens nicht, wenn der Luftkühler mit Soleberieselung arbeitet, so war dies also doch hier der Fall. Das Luftvolumen bei —1,38° C ist 16 550 cbm/st, die Sättigungsmenge bei der gleichen Temperatur ist 0,00409 g/cbm. Der gesamte Wasserdampfgehalt beim Austritt ist also $16\,550 \cdot 0{,}00409 = 67{,}7$ kg/st.

Wenn in den Luftkühler 84,2 kg/st Dampf eintreten und 67,7 kg/st aus ihm austreten, so sind 16,5 kg Feuchtigkeit niedergeschlagen worden. Die Kondensationswärme des Kilogramms pflegt man zu 600 Kal anzunehmen. Diese Zahl trifft auch insofern leidlich zu, als der Wärmeinhalt des Dampfes bei 0° (verglichen mit Wasser von 0°) 595 Kal beträgt. Es werden dann geleistet für die Kondensation von Feuchtigkeit $16{,}5 \cdot 600 = 9900$ Kal/st.

Zum Abkühlen der Luft sind insgesamt $27\,600 + 9900 = 37\,500$ Kal/st im Luftkühler geleistet worden. Dabei ist der Anteil der Kondensation in der Leistung immerhin 26% und darf keinesfalls übersehen werden.

Die Messung fand wie im letzten Beispiel des vorigen Paragraphen im Beharrungszustand statt. Wie bei jenem Beispiel wären noch Berichtigungen anzubringen, falls die von der Luft durchströmten Teile am Anfang und am Ende des Versuchs nicht die gleiche Temperatur hatten, so daß also ein Abkühlungsversuch positiv oder negativ über den eigentlichen Versuch übergelagert ist.

Es ist nur bedingt richtig, daß als Temperaturabnahme die des ganzen aus Luftkühler und Ventilator bestehenden Apparates in Rechnung gesetzt worden ist, wodurch also die Erwärmung im Ventilator gleich von der Kühlwirkung des Luftkühlers in Abzug gebracht wurde. Das ist nämlich nur dann richtig, wenn es sich um Untersuchung des ganzen Apparates handelt, und nicht etwa um die des Kühlers allein.

Wegen aller weiteren Auswertungen und Umrechnungen, die mit den Versuchen in Kühlmaschinen verbunden sind, muß auf das betreffende Kapitel der „Maschinenuntersuchungen" verwiesen werden.

Es soll nicht verschwiegen werden, daß eine Messung der eben beschriebenen Art erhebliche *Fehlerquellen* in sich birgt. Schon die Luftmessung pflegt unsicher zu sein; die Feuchtigkeitsmessung ist eine Differenzmessung (§ 17), da der Unterschied zweier Thermometerstände beobachtet wird; endlich erfolgt die Auswertung der niedergeschlagenen Feuchtigkeit wieder als Unterschied der ein- und der ausgetretenen. So wird die Meßmethode an sich unsicher. Dazu kommt, daß die Angaben verschiedener Tabellenwerke über den Sättigungsdruck und Sättigungsgehalt voneinander merklich abweichen. Man erhält so bei Benutzung verschiedener Tabellenwerke aus den gleichen Ablesungen etwas verschiedene Ergebnisse. Obiger Rechnung liegen die Zahlen der Hütte, 21. Aufl., I, 422, zugrunde. In der Meteorologie werden Psychrometertafeln benutzt, wie sie abgekürzt im Landolt & Börnstein zu finden sind, auch wohl die Dampfdrucktafel des Kgl. Preußischen Meteorologischen Instituts.

107. Ermittlung der Wärmemenge aus Dampfmengen. Wenn der Träger der zu messenden Wärmemengen ein Dampf ist, so ist bei Bestimmung des Wärmeinhaltes die latente Wärme des Dampfes zu berücksichtigen, ja sie macht meist den überwiegenden Anteil des gesamten Wärmeinhaltes aus. Die Wärmemenge, die beispielsweise dem Speisewasser eines Dampfkessels zuzuführen ist, um es in Dampf von dem Zustand zu verwandeln, in dem es den Kessel verläßt, setzt sich im allgemeinen aus drei Teilen zusammen. Zunächst ist das Speisewasser auf die Siedetemperatur t_s des Wassers zu erwärmen, entsprechend dem im Kessel herrschenden Druck p; hierfür kommt die spezifische Wärme des Wassers in Frage; den Wärmeinhalt des Wassers über den bei 0° hinaus bezeichnet man als seine *Flüssigkeitswärme*. Weiter ist das Wasser in Dampf von gleichem Druck p und gleicher Temperatur t_s zu verwandeln; hierfür kommt die *Verdampfungswärme* des Wassers in Betracht, die ebenso wie die spezifische Wärme auf 1 kg bezogen zu werden pflegt und die Tabellen zu entnehmen ist. Wo das Wasser nicht restlos in Dampf verwandelt wird, sondern ein Teil als Feuchtigkeit des Dampfes mitgerissen wird, ist die Verdampfungswärme nur für den wirklich verdampften Teil anzusetzen; der Feuchtigkeitsgehalt ist also zu bestimmen. Als dritter Posten ist bei der Erzeugung überhitzten Dampfes die *Überhitzungswärme* einzuführen: im Überhitzer wird der Dampf unter unverändertem Druck auf eine höhere als die Sättigungs- oder Siedetemperatur erhitzt; hierbei ist die spezifische Wärme des Wasserdampfes in Rechnung zu setzen. Da vor der Überhitzung zunächst eine Verdampfung der mitgerissenen Feuchtigkeit eintritt, so kann die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit unterbleiben, wenn man nur die Leistung des Kessels und Überhitzers zusammen kennen will.

Für die Auswertung ist es am einfachsten, den *Wärmeinhalt des Dampfes*, wie er den Kessel verläßt, und den des zum Kessel kommenden Speisewassers zu ermitteln und beide voneinander abzuziehen. Diese

Wärmeinhalte, das heißt die Mehrgehalte an Wärme gegenüber dem Wärmeinhalt von Wasser von 0° C, sind nämlich den Dampftabellen zu entnehmen, die sich beispielsweise im Taschenbuch der Hütte finden. Den Wärmeinhalt von Wasser kann man, nach den Darlegungen S. 332 befriedigend genau, numerisch gleich der Wassertemperatur setzen; den Wärmeinhalt gesättigten Dampfes gibt die Formel

$$i_s = 594{,}7 + 0{,}518\, t_s - 0{,}00068\, t_s^2 \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

befriedigend wieder, die den Angaben Molliers[1]) entspricht; der Wärmeinhalt überhitzten Dampfes kann nach Mollier

$$i = 594{,}7 + 0{,}477 \cdot t - \left[7{,}61 \cdot \left(\frac{273}{T}\right)^{\frac{10}{3}} - 0{,}023\right] \cdot p \quad . \quad (4)$$

gesetzt werden; es bedeutet t die Temperatur des Dampfes in Celsiusgraden, T die absolute Temperatur und p den Druck des Dampfes in Atmosphären (1 at = 1 kg/qcm). Man kann die aus dieser Formel folgenden Werte auch aus den von Mollier herausgegebenen graphischen Darstellungen[2]) entnehmen.

Eine ältere Rechnungsweise setzt nach Regnault den Wärmeinhalt gesättigten Dampfes $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\, t_s$, wo t_s die Sättigungstemperatur ist, die man zu jedem Druck p aus den Dampftabellen entnehmen kann; mit einer als konstant angenommenen spezifischen Wärme $c_p = 0{,}48$ wird die Überhitzungswärme $0{,}48 \cdot (t - t_s)$, so daß der Wärmeinhalt überhitzten Dampfes durch

$$i = 606{,}5 + 0{,}305\, t_s + 0{,}48\, (t - t_s) \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

gegeben wäre; diese Formel ist auch in den noch gültigen Normen für Dampfkesselversuche angegeben, sie ist aber als veraltet anzusehen, nachdem durch Lorenz, sowie durch Knoblauch, Linde und Klebe nachgewiesen ist, daß c_p durchaus nicht konstant ist, sondern in den weiten Grenzen von 0,45 bis 0,6 von Druck und Temperatur abhängt. Dieser Veränderlichkeit wird Formel (4) gerecht. Für Atmosphärenspannung und mäßige Überhitzung trifft indessen der alte Wert $c_p = 0{,}48$ leidlich zu.

Beispiel: So sei ein *Dampfkessel* 8 Stunden lang durchschnittlich mit Wasser von 52° gespeist worden und habe Dampf von 10,25 at absolutem Druck und 303° Temperatur erzeugt. Dann ist

$$i = 594{,}7 + 0{,}477 \cdot 303 - \left[7{,}61 \cdot \left(\frac{273}{576}\right)^{\frac{10}{3}} - 0{,}023\right] \cdot 10{,}25 = 594 + 144{,}7 - 6{,}3 = 732 \text{ WE}$$

pro kg Dampf. Die ältere Rechnungsweise hätte ergeben: die Sättigungstemperatur zu 10,25 at ist 180°, also wird der

---

[1]) Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf, Berlin 1906. Auch Hütte, 19. oder 20. Aufl. Die neuen Messungen von Henning, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 1769, ergeben bei Temperaturen über 70° etwas kleinere Werte; die Differenzen sind:

bei	100°	130°	150°	180°
·	—1,0	—2,6	—3,1 (Maximum)	—2,1 WE/kg.

[2]) Beilage zu: Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf.

Wärmeinhalt gesättigten Dampfes $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305 \cdot 180 = 661{,}3$ WE; die Überhitzung beträgt $303 - 180 = 123°$, entsprechend einer Überhitzungswärme $0{,}48 \cdot 123 = 59{,}1$ WE; der Wärmeinhalt des überhitzten Dampfes wäre danach $i = 661{,}3 + 59{,}1 = 720$ WE, also um 1,8% niedriger. — Wie man aber auch den Wärmeinhalt des überhitzten Dampfes berechnen möge, jedenfalls wird jetzt die Flüssigkeitswärme des Speisewassers mit 52 WE abzuziehen sein; also waren $732 - 52 = 680$ WE jedem verdampften Kilogramm zuzuführen. Waren also in den 8 st Versuchsdauer 17 160 kg Wasser gespeist worden, und hatte man dafür gesorgt, daß der Wasserstand im Kessel anfangs und am Ende der gleiche war (um die Unsicherheit in dieser Hinsicht unschädlich zu machen, dazu die lange Versuchsdauer), so wären stündlich $17\,160 : 8 = 2145$ kg verdampft worden und hätten $2145 \cdot 681 = 1\,461\,000$ WE/st nutzbar werden lassen.

Auch wo nicht der Wärmeinhalt des Dampfes selbst interessiert, sondern die Wärmeaufnahme eines Mediums gemessen werden soll, kann man die Messung auf eine Messung der Dampfmenge zurückführen. So bestimmt man die *Wärmeabgabe von Heizkörpern* einer Dampfheizung, indem man das niedergeschlagene Kondensat wägt und mit dem Unterschied des Wärmeinhaltes des ankommenden Dampfes und des abgehenden Kondensats multipliziert; diesen Unterschied führt man in weniger genauen Messungen oft einfach mit 600 WE/kg ein — so bei den Heizwertbestimmungen, S. 347 und 352, wo es sich nur um eine Art Korrektion handelt. — Auch die *Kälteleistung einer Kühlmaschine* kann man ermitteln, indem man eine Dampfschlange in die Sole legt und Dampf gerade in der Menge zuführt, daß die Wärmezufuhr durch Dampf der Wärmeentziehung durch die Maschine die Wage hält, so daß also die Temperatur der Sole weder steigt noch fällt. Die Kondensatmenge wird gemessen. Ratsam ist es in allen Fällen, wo genau gemessen werden soll, den zutretenden Dampf schwach zu überhitzen, da anderenfalls keine Gewißheit darüber besteht, wieviel Wasser der Dampf etwa mit sich führte.

Überall nämlich, wo die Dampftemperatur die dem Druck entsprechende Sättigungstemperatur nicht überschritten hat, kann der Dampf sowohl trocken gesättigt sein als auch beliebige Feuchtigkeitsmengen enthalten. Da der Wärmeinhalt des Wassers nur $^1/_4$ bis $^1/_6$ desjenigen von Dampf ausmacht, so bedingt ein Feuchtigkeitsgehalt einen wesentlichen Mindergehalt des Dampfes an Wärme. Bei Erzeugung gesättigten Dampfes im Kessel sowohl als auch bei Verwendung gesättigten Dampfes zur Messung der Wärmemenge, wie im Heizkörper und der Kältemaschine, wäre also eine Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes unerläßlich.

108. Ermittlung der Dampffeuchtigkeit. Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes geschieht fast allgemein mit Hilfe des *Drosselkalorimeters*. Dieses besteht (Fig. 277) aus einem einfachen Hohlgefäß, dessen Wände gegen Wärmeausstrahlung durch Isolation geschützt sind; die Isolation ist nicht gezeichnet. In ihn tritt der feuchte Dampf, dessen Spannung p_1 oder Temperatur t_1 man festgestellt hat (beide hängen ja voneinander

ab), durch ein Ventil A ein; in diesem wird er auf eine geringe Spannung gedrosselt. Da gesättigter Dampf von geringer Spannung weniger latente Wärme als solcher von hoher Spannung enthält, so wird die frei gewordene Wärme eine Überhitzung des Dampfes bewirken, aber erst nachdem sie den Dampf getrocknet hat. Je feuchter also der Dampf war, desto weniger wird er beim Drosseln überhitzt. Messen wir die Dampfspannung und die Dampftemperatur im Kalorimeter, bei p_2 und t_2, so können wir aus der Überhitzung auf die frühere Feuchtigkeit schließen. Der Dampf fließt unten ins Freie. Bei der Messung muß der Apparat im Beharrungszustand, insbesondere die Isolierung gut durchgewärmt sein.

Besteht 1 kg feuchten Dampfes aus x kg Dampf und $(1 - x)$ kg Wasser, und bezeichnet q_1 die Flüssigkeitswärme von 1 kg Wasser, λ_1 den Wärmeinhalt von 1 kg gesättigten Dampfes, beide bei der Anfangsspannung p_1 beziehungsweise der entsprechenden Temperatur t_{s1}, so ist also in den x kg Dampf die Wärmemenge $x \cdot \lambda_1$, und in den $(1 - x)$ kg Wasser die Wärmemenge $(1 - x) \cdot q_1$ enthalten; vor dem Drosseln war also in dem Kilogramm feuchten Dampfes die Wärmemenge $x \cdot \lambda_1 + (1 - x) \cdot q_1$ vorhanden. Bezeichnet weiterhin λ_2 die Gesamtwärme von 1 kg gesättigtem Dampf bei der Spannung p_2 im Drosselkalorimeter, bezeichnet $t_2 - t_{s2}$ die Anzahl von Graden, um welche Überhitzung eingetreten ist, und c_p die spezifische Wärme des Dampfes bei der Überhitzung, so ist der Wärmeinhalt von 1 kg Dampf, wie er im Kalorimeter vorliegt, $\lambda_2 + c_p \cdot (t_2 - t_{s2})$. Da Wärme nicht in erheblichem Maße zu- oder abgeführt ist, wegen der guten Isolierung des Ganzen, so muß sein

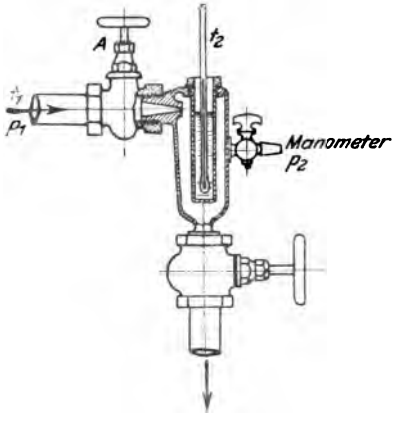


Fig. 277. Drosselkalorimeter von Schaeffer & Budenberg.

$$x \cdot \lambda_1 + (1 - x) \cdot q_1 = \lambda_2 + c_p \cdot (t_2 - t_{s2}),$$

woraus folgt:

$$x = \frac{\lambda_2 + c_p \cdot (t_2 - t_{s2}) - q_1}{\lambda_1 - q_1} \quad \ldots \ldots \quad (6)$$

Sämtliche Größen hierin lassen sich den Dampftabellen entnehmen, wie ein Beispiel zeigen wird. c_p pflegt man zu 0,48 anzunehmen.

Dampf von 10,7 at Überdruck sei kalorimetriert worden, und man habe im Drosselkalorimeter bei einem Überdruck von 350 mm QuS = 0,476 at eine Temperatur von 136,2°C abgelesen. Barometerstand 740 mm QuS = 1,01 at. — Bei Dampf von 10,7 + 1,01 = 11,7 at absolutem Druck entnehmen wir den Dampftabellen: $\lambda_1 = 667{,}8$; $q_1 = 188{,}6$. Bei dem gedrosselten Dampf von 0,476 + 1,01 = 1,49 at

absolutem Druck ist $\lambda_2 = 643{,}9$ und die Sättigungstemperatur 109,5°C. Die Überhitzung ist also $t_2 = t_{s2} = 136{,}2 - 109{,}5 = 26{,}7°$. Damit wird $x = 0{,}978$; der Dampf enthielt rund 2% Feuchtigkeit.

Da die äußere Form des Drosselkalorimeters unwesentlich ist, so kann man sich eins aus Gasrohrenden leicht selbst zurechtbauen. Man achte auf gute Einhüllung. Das Ventil *A* der Fig. 277 soll stets ganz geöffnet sein; zum Drosseln genügt die Düse. Je größer nämlich die arbeitende Dampfmenge, desto weniger Einfluß haben die Strahlungsverluste.

Wir haben dieser Rechnung die veraltete Annahme einer unveränderlichen spezifischen Wärme des Wasserdampfes zugrunde gelegt, um das Grundsätzliche einfacher zu besprechen. Im gegebenen Fall empfiehlt es sich, lieber das Mollier sche Dampfdiagramm zu benutzen. Aus ihm ergibt sich für unser Beispiel, indem wir einfach vom Punkte $p = 1{,}49$, $t = 136{,}2$ wagerecht nach rechts einer Linie gleichen Wärmeinhaltes folgen, für $p = 11{,}7$ ein Feuchtigkeitsgehalt von 2,3%. Man darf sich aber von der einen wie der anderen Rechnungsweise keine große Genauigkeit versprechen, solange man die Untersuchung an einer Dampfprobe macht.

Man erkennt leicht oder kann sich durch Nachrechnen davon überzeugen, daß das Drosselkalorimeter nur für mäßige Feuchtigkeitsgrade, 2 bis 4%, brauchbar ist. Sehr feuchter Dampf wird zwar im Kalorimeter etwas getrocknet, aber doch nicht ganz oder gar überhitzt. Da indes vor jeder Maschine ein Wasserabscheider in die Dampfleitung eingeschaltet ist, so pflegt der zu untersuchende Dampf auch nicht sehr feucht zu sein. Will man jedoch untersuchen, wie feucht der von einem Kessel aus erzeugte Dampf ist, so reicht gelegentlich das Drosselkalorimeter nicht aus. — Man erkennt das daran, daß man am Kalorimeter die Sättigungstemperatur des Dampfes abliest, und muß dann alle Schlüsse unterlassen.

Für solche Fälle kann gelegentlich das von Carpenter angegebene *Abscheidekalorimeter* dienen. In ihm wird der Dampf mechanisch von Feuchtigkeit befreit und diese gemessen[1]).

Da das Abscheidekalorimeter den Dampf nicht ganz sicher trocknet, wird man gut tun, noch ein Drosselkalorimeter dahinter zu schalten.

Andere Methoden beruhen etwa darauf, daß man dem nassen Dampf mittels elektrischer Widerstände so viel Wärme zuführt, daß er eben überhitzt wird. Das ergibt Anordnungen ähnlich dem Thomasmesser, Fig. 144, S. 189; die erforderliche Energiezufuhr mißt man elektrisch. Es ist 1 KW = 859 WE/st. Man kann auch die Wärmezufuhr durch Dampf von höherer Spannung bewirken, der sie durch Kupferspiralen überträgt. Man kann auch den Dampf kondensieren und dabei kalorimetrisch seinen Wärmeinhalt feststellen. Und noch manche andere Methode ist vorgeschlagen. Für jede Methode aber gilt das Folgende.

Man ist nur selten in der Lage, den Dampf als Ganzes einer Feuchtigkeitsuntersuchung zu unterwerfen. Man leitet vielmehr einen kleinen

[1]) Abbildung und Beschreibung in den früheren Auflagen dieses Buches.

Zweigstrom in das Kalorimeter und prüft diesen. Da kann nun das Kalorimeter im besten Fall die Probe richtig untersuchen; stellt diese Probe keinen Durchschnitt des Dampfes dar, so trifft die Schuld für ein falsches Resultat nicht das Kalorimeter, sondern die Art der *Probenahme*. Man entnimmt die Probe nach Fig. 278: Das Entnahmeröhrchen wird noch quer durch das Dampfrohr hindurchgeführt und ist mit Löchern versehen; es ist am Ende zu oder offen. Man hofft so, wenn der Dampf im Rohr nach konzentrischen Schichten gleichmäßig verteilt ist, von jeder Schicht gleichviel zu bekommen. Da in wagerechten Rohren Wasser am Boden entlang läuft, so soll man den Entnahmestutzen in ein senkrechtes Rohr legen, in dem überdies noch der Dampf aufwärts gehen soll. Außerdem muß man das Röhrchen bis zum Kalorimeter hin gut verpacken, sonst verliert der Dampf noch Wärme.

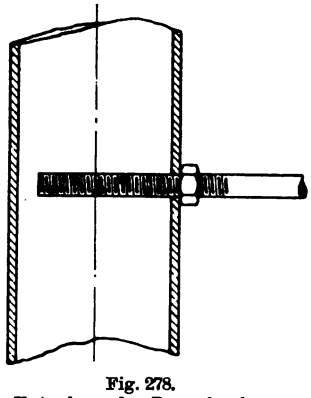


Fig. 278.
Entnahme der Dampfprobe.

Aber trotz dieser Vorsichtsmaßregeln dürfte die Probe selten den Durchschnitt darstellen. Das schwerere Wasser wird im allgemeinen mehr als der Dampf das Bestreben haben, geradeaus zu gehen, und es wird zu trockener Dampf in das Kalorimeter kommen. Jede Untersuchung der Dampfgüte ist daher von zweifelhaftem Wert: in der Tat werden bei uns solche Bestimmungen selten gemacht, während sie in Nordamerika recht gebräuchlich sind. Welche Art von Kalorimeter man verwendet, ist hierfür gleichgültig. Das Drosselkalorimeter ist das bequemste und ist an sich durchaus einwandfrei. Ebenso einwandfrei ist die angeführte Kombination aus Abscheide- und Drosselkalorimeter.

In den seltenen Fällen, wo man den ganzen Dampf untersuchen kann, fallen diese Einwände fort. Das ist etwa der Fall, wenn man die Spannung (in Heizanlagen) durch ein Druckminderventil reduzieren kann; dieses ist dann direkt als Drosselkalorimeter zu benutzen.

XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.

109. Einheiten. Für feste Brennstoffe — Kohle — geschieht die Bestimmung des Heizwertes heute allgemein mit Hilfe der Bombe, für flüssige und gasförmige — Benzin oder Petroleum, Leucht- oder Generatorgas und andere — ebenso allgemein mit Hilfe des Junkers-Kalorimeters.

Unter Heizwert versteht man diejenige Wärmemenge, die die Mengeneinheit des betreffenden Brennstoffes bei vollkommener Verbrennung der Bestandteile und darauffolgender Abkühlung auf die Tem-

peratur der Umgebung an diese abgibt. Der Heizwert ist unabhängig davon, ob die Verbrennung in Luft oder in reinem Sauerstoff erfolgt, und ob der vorhandene Sauerstoff zur Verbrennung gerade ausreicht oder im Überschuß vorhanden ist, ist auch unabhängig von der Spannung, bei der sie erfolgt, sofern nur nicht die Bildung von CO und anderen selbst noch brennbaren Bestandteilen oder das Unverbranntbleiben schwerer Kohlenwasserstoffe die Folge ungünstiger Bedingungen ist. Die genannten Verhältnisse beeinflussen nur die bei der Verbrennung eintretende Temperatursteigerung.

Als Mengeneinheit, auf die der Heizwert bezogen wird, dient bei festen und flüssigen Körpern das Kilogramm, wenn man nach Kilogrammkalorien, oder das Gramm, wenn man nach Grammkalorien rechnet; bei gasförmigen Brennstoffen bezieht man den Heizwert auf das Kubikmeter, wobei natürlich das auf 0° und 760 mm QuS reduzierte Volumen einzuführen ist, und zwar pflegt man bei gasförmigen Brennstoffen nach Grammkalorien zu rechnen. Heizwertangaben haben also die Benennungen: $\frac{\text{WE}}{\text{kg}} = \frac{\text{gr cal}}{\text{gr}}$; $\frac{\text{gr cal}}{\text{cbm}\,(^{0}_{760})}$. In physikalisch-chemischen Werken geschieht die Angabe des Heizwertes oft bezogen auf Gramm-Moleküle, das heißt auf die Anzahl von Gramm, die dem Molekulargewicht des Stoffes entspricht. So wird man für Methan CH_4 den (oberen) Heizwert 213,5 gr cal/gr mol angegeben finden; da das Molekulargewicht des Methans $12 + 4 \cdot 1 = 16$ (genauer 16,03 ist), so ist sein Heizwert, nach technischer Ausdrucksweise, $\frac{213{,}5}{16{,}03} \cdot 1000 = 13320$ WE/kg; oder bei einem spezifischen Gewicht des Methans von 0,716 kg/cbm $\left(^{0}_{760}\right)$ ist der Heizwert $13320 \cdot 0{,}716 = 9540$ WE/cbm $\left(^{0}_{760}\right)$.

110. Oberer und unterer Heizwert. Die maschinentechnisch in Frage kommenden Brennstoffe bestehen durchweg aus Kohlenstoff C, Wasserstoff H, Sauerstoff O und aus Verbindungen dieser drei; die meisten enthalten auch noch 1 bis 2% Schwefel S. Außerdem enthalten sie fast immer Wasser, das bei festen oder flüssigen Brennstoffen in kondensierter Form in den Prozeß eintritt, bei gasförmigen Brennstoffen als Feuchtigkeit dampfförmig vorhanden ist. Ferner enthält auch die zur Verbrennung zugeführte Luft eine gewisse Wassermenge als Luftfeuchtigkeit und nimmt sie fast immer in Dampfform in den Prozeß hinein. Bei vollkommener Verbrennung entsteht Kohlensäure CO_2 und Wasser H_2O. Während die Kohlensäure immer gasförmig abgeht, kann das Wasser entweder als Wasserdampf oder in flüssiger Form den Verbrennungsraum verlassen; das wird namentlich von der Endtemperatur der Abgase abhängen.

Je nachdem nun das teils schon im Brennstoff vorhandene, teils bei der Verbrennung entstandene Wasser Dampf bleibt oder verflüssigt wird, wird der Heizwert verschieden hoch ausfallen. Entweichender Wasserdampf entführt ja in latenter Form große Wärmemengen — rund 600 WE pro kg Dampf —, die dann als fühlbare Wärme in die Erscheinung treten und nutzbar werden, wenn der Wasserdampf sich nieder-

schlägt. Der kalorimetrisch gemessene, wie auch der in einer Feuerung nutzbar werdende Heizwert ist also kleiner, wenn das Wasser als Dampf abgeht, größer, wenn es sich zu verflüssigen Gelegenheit hat.

Man pflegt den auf Wasserdampf als Verbrennungsprodukt bezogenen den *unteren Heizwert*, den anderen den *oberen Heizwert* zu nennen. Beide unterscheiden sich um den mit 600 multiplizierten Wassergehalt der Verbrennungsprodukte.

Es ist nun die Frage, ob der untere oder der obere Heizwert bei der Bewertung des Brennstoffes in Betracht zu ziehen ist. Entsprechend den Vorschriften der Normen des Vereins Deutscher Ingenieure pflegt man in Deutschland den unteren als maßgebend in die Rechnung einzuführen, in Amerika dagegen gilt der obere — woraus allein schon folgt, daß sich für jeden etwas sagen läßt.

Die Frage ist auch nicht belanglos insofern, als der Unterschied zwischen beiden Heizwerten recht bedeutend ist: beide verhalten sich bei Steinkohle etwa wie 7500 zu 7200 WE, bei Braunkohle wie 4500 zu 4200, bei Petroleum wie 10 500 zu 9750, bei Leuchtgas wie 5400 zu 4800 WE. Der Unterschied wird um so größer, je mehr Wasser und namentlich je mehr Wasserstoff der Brennstoff prozentual enthält.

Wenn man mit dem unteren Heizwert rechnet, so errechnet man den Wirkungsgrad der mit dem betreffenden Brennstoff versorgten Feuerung oder der mit ihm betriebenen Maschine höher, als wenn man den höheren Wert als in den Prozeß eingeführt in Rechnung setzt. Es fragt sich, ob man die Tatsache, daß der Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert praktisch nicht ausgenutzt wird, dem Brennstoff oder der Maschine beziehungsweise Feuerung zur Last legen solle.

Zunächst für die Ausnutzung von Brennstoffen zur *unmittelbaren Arbeitserzeugung* in Verbrennungsmotoren wird man die Annahme des unteren Heizwertes als berechtigt anerkennen müssen. Nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre kann Wärme niemals ganz, sondern immer nur zu einem Bruchteil in Arbeit umgesetzt werden, und dieser Bruchteil ist um so kleiner, bei je geringerer Temperatur die betreffende Wärmemenge frei geworden ist. Während nun im Verbrennungsmotor der Verbrennungsvorgang bei Temperaturen von über 1000° erfolgt, und die durch den Verbrennungsvorgang frei werdende Wärme bei diesen hohen Temperaturen frei wird, so wird die durch Kondensation des Wasserdampfes zu erhaltende Wärme, wenn überhaupt, so doch jedenfalls nur bei niedrigen Temperaturen in Freiheit gesetzt werden. Die Arbeitsfähigkeit der Wärmemenge, die dem Unterschiede zwischen oberem und unterem Heizwert entspricht, ist also wesentlich geringer als die dem unteren Heizwert entsprechende; sie ist eine minderwertige Wärmemenge. Im Diagramm des Gasmotors macht sich das so kenntlich, wie Fig. 279 es andeutet. Das Diagramm sei so gestaltet, und der Heizwert des Gases sei ein solcher gewesen, daß von A an Temperaturen und Dampfteildrucke solche Werte annehmen, daß das Wasser sich verflüssigt. Nun erkennt man ohne weiteres, wie gering der Zuwachs an Diagrammfläche ist, der durch das Freiwerden der latenten Wärme noch zu erwarten ist, zumal sie erst allmählich von A ab frei

wird; es ist nur die kleine Fläche *1* zu gewinnen, während ein gleichgroßer Wärmezuwachs, der bei *B* bei höherer Temperatur eingetreten wäre infolge höheren unteren Heizwertes, den Zuwachs um die punktierte Fläche *2* geliefert hätte: seine Arbeitsfähigkeit ist eine größere.

Wo es sich also um Ausnutzung der Wärme zur Arbeitserzeugung handelt, wird der Wert des Brennstoffes durch den unteren Heizwert besser ausgedrückt als durch den oberen. Diese theoretischen Erwägungen ergänzen die praktischen, die da besagen, daß man ja tatsächlich niemals bis an die Grenze herankommt, wo die Verflüssigung beginnt.

Bei der Ausnutzung der Wärme zu *Heizzwecken* müssen wir von anderen Gesichtspunkten ausgehen. Bei solcher Verwendung ist alle Wärme gleichwertig, sie sei bei hoher oder bei niederer Temperatur frei geworden — immerhin noch mit einem Vorbehalt insofern, als nach demselben zweiten Hauptsatz der Wärmelehre und nach der Erfahrung die Wärme nur vom wärmeren zum kälteren Körper geht, nicht umgekehrt. Zur Beheizung eines Dampfkessels, dessen Inhalt sich auf 180° befindet, ist also der Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert, der diesmal erst unter 100° frei wird, wieder nicht verwendbar, wenigstens nicht unmittelbar: man könnte aber mit seiner Hilfe das kalte Kesselspeisewasser vorwärmen und so ihn für den Dampfkessel nutzbar machen. Deshalb wird man sagen können, es sei nicht Schuld des Brennstoffes, wenn nicht durch Anordnung von Vorwärmeeinrichtungen dafür Sorge getragen wird, daß er die Wärme vollständig abgeben kann, die er abzugeben bereit ist.

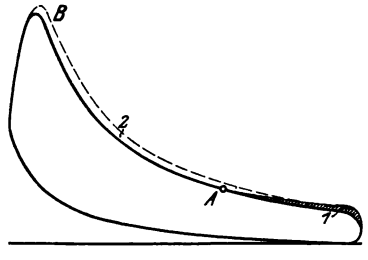


Fig. 279. Veranschaulichung der Minderwertigkeit der latenten Wärme (nach E. Meyer).

Es erhebt sich aber die Frage, ob denn der Brennstoff überhaupt zur Hergabe des Unterschiedes zwischen oberem und unterem Heizwert bereit ist, wenn man seine Verbrennungsgase genügend weit, das heißt also auf die Temperatur der Umgebung, abkühlt. Die Antwort hierauf ist die, daß er zur Hergabe dieses Unterschiedes nur dann bereit ist, wenn die zur Verbrennung zugeführte Luft mit Feuchtigkeit gesättigt war; bei gasförmigen Brennstoffen ist auch die Sättigung des Gases selbst mit Feuchtigkeit erforderlich. In jedem anderen Fall kann der Unterschied entweder gar nicht oder nur unvollständig hergegeben werden. Feuchtigkeit kann sich nämlich immer erst dann aus den Rauchgasen, auch bei vollständiger Abkühlung derselben niederschlagen, wenn die Sättigung des Gasvolumens mit Wasserdampf erreicht worden ist. Das Volumen der Abgase ist nun bei Kohle wenig von dem der zugeführten Luft verschieden; bei Leuchtgas unterscheidet es sich kaum von der Summe der Volumina, die Gas und Luft zusammen vorher einnahmen. Wir werden das noch teilweise in § 118 zu besprechen

haben, wollen es hier aber als bekannt voraussetzen. Wenn nun die Verbrennungsgase mit der Zuführungstemperatur der Luft beziehungsweise von Gas und Luft abgingen, so bedürften sie zur Sättigung gerade soviel Feuchtigkeit wie diese; waren diese gesättigt zugeführt worden, so muß alles durch Verbrennung gebildete Wasser herausfallen. Im anderen Falle wird Verbrennungswasser als Dampf abgehen — ein wie großer Teil des gesamten, das hängt vom Wasserstoffgehalt des Brennstoffes und von der zugeführten Luftmenge ab, die in weiten Grenzen variieren kann. Praktisch liegen die Verhältnisse so, daß bei Stein- und Braunkohle etwa die Hälfte des Verbrennungswassers herausfiele, wenn man die Luft trocken zuführte, Luftüberschuß vermiede und die Ausnutzung bis 20° herabtriebe.

Es ließe sich also eine volle Ausnutzung des oberen Heizwertes erreichen, wenn man für Zuführung der Luft in gesättigtem Zustande und für eine so große Heizfläche sorgte, daß die Heizgase bis auf Umgebungstemperatur abgekühlt würden: zwei Forderungen, denen nur praktische Bedenken, aber keine theoretische Unmöglichkeit entgegenstehen. Es ist daher nicht folgerichtig, als Abgasverlust eines Verbrennungsvorganges nur das anzusehen, was der spezifischen Wärme der Rauchgase entspricht; die latente Wärme des Wasserdampfes steht genau auf gleicher Stufe mit jener, sobald es sich nicht um direkte Arbeitserzeugung handelt. Man sollte in diesem Fall den oberen Heizwert als maßgebend ansehen, dessen Verwendung den Wert des Brennstoffes höher, den Wirkungsgrad der Feuerung entsprechend geringer erscheinen läßt.

Nach diesen Darlegungen wäre der obere Heizwert maßgebend, wo es sich um den eigentlichen Heizwert handelt; der untere wäre zu verwenden, wo es auf die Arbeitsfähigkeit des Brennstoffes ankommt. Solcher Unterscheidung steht im Wege, daß in den Normen des Vereins Deutscher Ingenieure ganz allgemein die Verwendung des unteren Heizwertes vorgeschrieben ist — im Gegensatz zu Amerika, wo ganz allgemein der obere verwendet wird. Wie irreführend unser Gebrauch sein kann, erhellt daraus, das in den bekannten Gasbadeöfen der obere Heizwert des Gases fast ganz ausgenutzt wird; man kann also an ihnen nach unseren Normen rechnend, leicht Wirkungsgrade über eins erhalten.

111. Feste Brennstoffe. Den Heizwert fester Brennstoffe bestimmt man mit Hilfe des *Bombenkalorimeters*. Zweckmäßig ist eine Form der Bombe, die die nachfolgende Untersuchung der Verbrennungsprodukte gestattet, wie die in Fig. 280 dargestellte. Dieselbe besteht aus einem innen emaillierten Stahlbehälter mit abschraubbarem Deckel. Der Deckel hat zwei Bohrungen. Diese sind durch kleine Ventile verschließbar, sie münden bei *a* und *b*, und man kann dort Röhrchen anschrauben, um den Verbrennungssauerstoff einzuführen, und um später das Verbrennungswasser zu entnehmen. Sonst setzt man kleine Verschlußschrauben auf *a* und *b*, um Staub abzuhalten. Das Platinrohr *c* sorgt dafür, daß der Sauerstoff durch die ganze Bombe streichen muß. Es bildet gleichzeitig den einen Pol für die elektrische Zündung; der andere, *d*, geht isoliert durch den Deckel. Bei + und — wird die Stromquelle

angeschlossen. Ein in die abgewogene Kohle gebetteter Eisendraht wird mit den Enden um die beiden Pole geschlungen. Sein Erglühen bewirkt die Zündung der Kohle, nachdem man sie in der Bombe in eine Sauerstoffatmosphäre von etwa 20 at gebracht hat. Sauerstoff ist, auf 100 at komprimiert, im Handel zu haben.

Bei der Zündung steht die Bombe in einem Kalorimeter (Fig. 281). Dies ist ein mit abgewogenem Wasser gefülltes Metallgefäß, zum Schutz gegen Wärmestrahlung mit einem Wassermantel und Deckel versehen. Ein Rührwerk sorgt für gleiche Temperatur des ganzen Wasserinhaltes; ein fein geteiltes Thermometer läßt sie ablesen. Nachdem man die gefüllte Bombe eingesetzt hat, wartet man den Temperaturausgleich des ganzen Systems ab. Dann beobachtet man einige Minuten lang die klei-

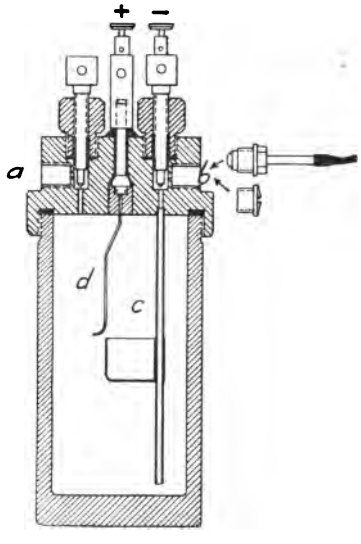


Fig. 280.
Krökerbombe von Julius Peters.

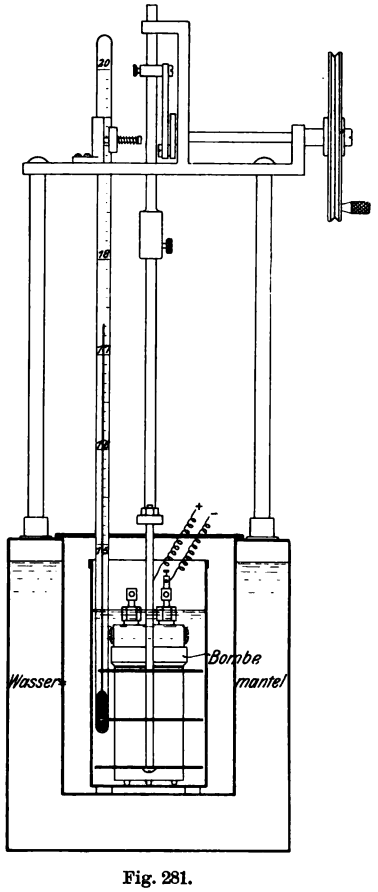


Fig. 281.
Bombenkalorimeter von Peters.

nen Änderungen, die noch infolge von Strahlung vor sich gehen, indem man alle Minuten das Thermometer abliest; mit diesen Ablesungen fährt man fort, nachdem man gezündet hat, bis die Temperatur nicht mehr steigt, und noch einige Minuten länger. Wenn man nun das Kohlengewicht G, die Temperaturzunahme Δt und das Gewicht erwärmten Wassers W nennt, so wird der Heizwert, und zwar der obere $\mathfrak{H}_o$, aus der Überlegung zu ermitteln sein, daß die erzeugte Wärme-

menge einerseits durch das Produkt $G \cdot \mathfrak{H}_o$, andererseits durch $W \cdot \Delta t$ gegeben ist; so ist

$$\mathfrak{H}_o = \frac{W \cdot \Delta t}{G} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Wollen wir den oberen Heizwert kennen, so ist der Versuch zu Ende. Anderenfalls beginnt die langwierigere Arbeit der Messung des gebildeten Wassers. Zu dem Zweck schraubt man bei *b*, Fig. 280, ein kurzes Rohrende auf und schließt mittels Gummischlauches eine abgewogene Chlorkalziumvorlage an (Fig. 282). Man öffnet vorsichtig das Ventil, die Spannung entweicht durch die Vorlage, die Feuchtigkeit wird durch das Chlorkalzium absorbiert. Weiterhin saugt man Luft durch die Bombe und die Vorlage und erwärmt gleichzeitig die Bombe längere Zeit in einem Ölbade auf etwas über 100°; dann wird alles Wasser abdestillieren und vom Chlorkalzium absorbiert werden. Zum Schluß stellt man die Gewichtszunahme des Chlorkalziumrohres fest[1]). Das Ansaugen geschieht mit Aspirator, Gummigebläse oder Wasserstrahlluftpumpe. Damit die angesaugte Luft trocken in die Bombe hineinkommt, wird eine zweite Chlorkalziumvorlage auf der anderen Seite der Bombe angebracht. Ist nun w_1 das aus 1 kg Kohle entstandene Wassergewicht, so ist der untere Heizwert

$$\mathfrak{H}_u = \mathfrak{H}_o - 600 \cdot w_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Ein *Aspirator*, wie er eben erwähnt wurde, dient zum Ansaugen von Gas und ist häufiger zu benutzen. Man kann ihn aus zwei Glasflaschen herstellen, in deren doppelt durchbohrte Stopfen (am besten Gummi) je ein kurzes und ein langes Glasrohr luftdicht eingesetzt sind. Die beiden langen Rohre werden durch einen wassergefüllten Schlauch verbunden, nachdem man eine Flasche ganz und die andere so weit mit Wasser gefüllt hatte, daß das lange Rohr eintaucht (Fig. 282). Stellt man die volle Flasche *A* hoch, so wirkt der Schlauch als Heber, und das übertretende Wasser saugt Gas in die Flasche *A*; ist *B* voll, so wechselt man die Flaschen schnell aus. Zum Absperren der Schläuche dienen bei Bedarf Quetschhähne. — Beim Überschieben von Gummischläuchen über Röhren mache man die Röhren naß.

Die *Handhabung der Bombe* können wir in folgende kurze Anweisung zusammenfassen: Brikett mit eingelegtem eisernen Zünddraht herstellen (siehe später) und wägen, nötigenfalls Eisendraht vorher wägen. Bombe aus Chlorkalziumglocke nehmen, worin sie aufbewahrt wird, Brikett mittels Zünddraht anbinden, ein kleiner Tiegel wird unter ihn gehängt. Deckel zuschrauben, sanft, aber kräftig; ein Schlüssel liegt der Bombe bei. Sauerstoffflasche bei *a* anschließen, beide Ventile (Fig. 280) öffnen, Sauerstoffflasche öffnen, Sauerstoff durchblasen lassen. Ventil bei *b* schließen, Manometer beobachten; sind 20 at erreicht,

[1]) Diese Bestimmung des Verbrennungswassers durch Abdestillieren ist nach Langbein, Z. f. angewandte Chemie 1900, S. 1227, unzuverlässig; mir sind grobe Unstimmigkeiten dabei nicht aufgefallen, auch wird sie viel verwendet. Der zitierte Aufsatz sei übrigens zum Studium empfohlen, so wegen der hier nicht besprochenen Fehler aus Schwefelsäure- und Salpetersäurebildung.

Sauerstoffflasche schließen, Ventil bei *a* schließen. Bombe losnehmen, Löcher bei *a* und *b* durch kleine Schrauben verschließen; elektrische Leitung anschließen, Bombe ins Kalorimeter, in dem so viel Wasser abgewogen ist, daß Bombe bedeckt ist; Blasen dürfen nicht aufsteigen, sonst ist die Bombe undicht. Rührwerk in Gang gesetzt; mechanisch oder von Hand. Thermometer von Minute zu Minute ablesen, bis Beharrung vorhanden; dann Zündung; weiter ablesen, bis Temperaturmaximum erreicht und 7 bis 10 Minuten länger. Bombe aus dem Kalorimeter in Ölbad setzen, Ansatzrohre bei *a* und *b* anschrauben, Chlorkalziumvorlagen beiderseits anschließen, die bei *a* sei gewogen. Druck vorsichtig durch Ventil bei *a* aus Bombe auslassen, Bombe wieder schließen. Aspirator auf der Seite von *a* anschließen, Ventil bei *a* öffnen, dann Ventil bei *b* öffnen. Die Reihenfolge ist wesentlich, damit nicht Gase an der falschen Seite der Bombe austreten. Aspirator muß etwa $^1/_2$ Stunde lang langsam saugen; während der

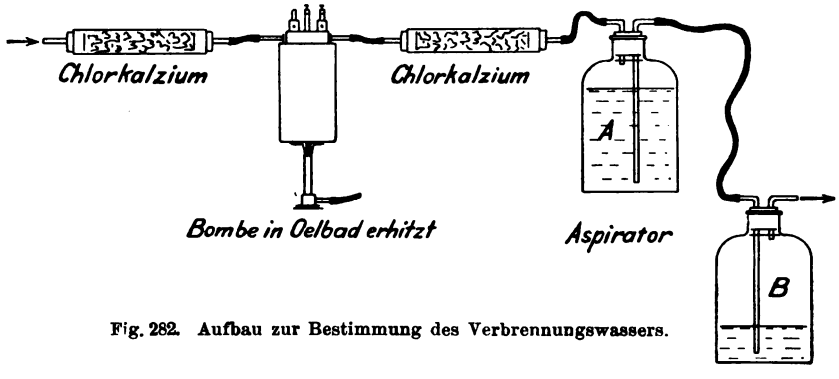


Fig. 282. Aufbau zur Bestimmung des Verbrennungswassers.

letzten Minuten Ölbad auf 105° bis 110° erwärmen. Zum Schluß die eine Vorlage wieder wägen. Bei sehr nasser Kohle (Braunkohle) muß man mehrere Chlorkalziumvorlagen hintereinanderschalten, um sicher alles Wasser aufzufangen; die letzte darf keine Gewichtszunahme zeigen.

Über die *Auswertung* ist folgendes zu bemerken. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme wird nicht nur auf das Wasser des Kalorimeters, sondern zum Teil auf das Metall der Bombe und des Kalorimeters übertragen; diese Teile werden mit erwärmt. Wenn zum Erwärmen der Metallteile um 1° eine Wärmemenge von 350 Kalorien nötig ist, so nennt man diese Zahl 350 den *Wasserwert* des Kalorimeters: die Bombe absorbiert ebensoviel Wärme, wie 350 g Wasser täten. Man hat bei der Berechnung die abgewogene Wassermenge um den Wasserwert des Kalorimeters zu vermehren und mit dieser fingierten Wassermenge zu rechnen. — Man ermittelt den Wasserwert nicht rechnerisch aus den Gewichten der Metallteile und ihrer spezifischen Wärme, sondern viel besser experimentell, indem man einen Stoff in der Bombe verbrennt, dessen Heizwert bekannt ist, und zusieht, welchen Wasserwert man annehmen muß, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Es ist selbst-

verständlich, daß man solche Fundamentalversuche, die allen späteren als Grundlage dienen sollen, besonders sorgfältig und zur Kontrolle mehrfach ausführt. — Als Probebrennstoffe dienen chemisch reine Benzoesäure $C_7H_6O_2$ mit 6330 WE oberem Heizwert, Kampher $C_{10}H_{16}O$ mit 9305 WE, oder andere.

Weiterhin wird man beachten müssen, daß nicht nur die Kohle, sondern auch der zur Zündung eingebettete *Eisendraht* Wärme erzeugt. Man hat erstens das Gewicht des Eisendrahtes vom Kohlegewicht abzuziehen, um zu finden, wieviel Kohle verbrannt ist; man hat zweitens die vom Eisen erzeugte von der gesamten Wärmemenge abzuziehen, um die von der Kohle erzeugte Wärmemenge zu bekommen. 1 g Eisen gibt bei vollkommener Verbrennung 1600 gr cal.

Einen sehr kleinen Fehler macht der Umstand, daß der zur Verbrennung benutzte Sauerstoff etwas feucht ist: diese Feuchtigkeit mißt man nachher, als wenn sie der Kohle entstammte.

Bedeutender ist aber meist die *Strahlungsberichtigung*, die wir vorhin schon erwähnten. Der Temperaturunterschied $t_2 - t_1$ kann nicht unmittelbar abgelesen werden. Infolge des fortwährenden Wärmeaustausches zwischen dem eigentlichen Kalorimeter und dem Wassermantel (Ein- oder Ausstrahlung) ändert sich die Temperatur des Kalorimeters schon vor und auch noch nach der Verbrennung; doch findet auch während der eigentlichen Temperatursteigerung des Kalorimeters, die etwa 8 bis 10 min zu dauern pflegt, eine Strahlung statt, der man durch Anbringung der Strahlungsberichtigung an der abgelesenen Temperaturerhöhung Rechnung trägt. Für Berechnung der Strahlungskorrektion nimmt man meist die Gültigkeit des Newtonschen Strahlungsgesetzes an, wonach die aus- oder eingestrahlte Wärmemenge dem Temperaturunterschied zwischen Kalorimeter und Umgebung und außerdem natürlich der Zeit proportional ist. Diesen beiden Größen ist daher auch, weil es sich um eine unveränderte Menge des Kalorimeterinhaltes mit unveränderlich gesetzter spezifischer Wärme handelt, der Temperaturverlust oder -gewinn des Kalorimeters infolge der Strahlung proportional.

Wenn wir nun in Fig. 283 in der Kurve $ABCDEFG$ den beobachteten Verlauf der Kalorimetertemperatur und in A_1G_1 den Verlauf der Manteltemperatur abhängig von der Zeit auftragen, so geben die Abstände beider Kurven den Temperaturunterschied und daher die durch sie und zwei Zeitordinaten, etwa A_1A und B_1B, begrenzten Flächen, die in der betreffenden Zeit, 11 h 50 bis 11 h 51, vom Kalorimeter in den Mantel gegangene Wärmemenge oder den Temperaturverlust des Kalorimeters; bei FG ist dieser Verlust größer, im Verhältnis wie die dort schraffierte Fläche größer ist. Die Kurven AC und EG sind logarithmische Kurven, wenn die Manteltemperatur geradlinig verläuft.

Bei verschieden gestalteten Kurven des Temperaturanstieges ist die Strahlung die gleiche, wofern nur die unter der Anstiegkurve liegende Fläche die gleiche ist. Daher kann man einen idealen Verbrennungsvorgang mit plötzlichem Wärmeübergang und gleichwertigen Strahlungsverhältnissen konstruieren. Man verlängert die beiden Kur-

ven AC und GE nach der Mitte zu und zieht eine Senkrechte xy so, daß die beiden unter- und oberhalb der Temperaturkurve abgeteilten dreieckigen Zwickel flächengleich werden. Die auf dieser Senkrechten abgeteilte Strecke xy stellt die berichtigte Temperatursteigerung dar, weil dieser momentane Temperaturanstieg für Strahlungseinflüsse keine Zeit gelassen hätte. Dabei zieht man die Senkrechte xy ausreichend genau nach dem Augenmaß. Man benutzt Millimeterpapier und wählt den Maßstab etwa: wagerecht 1 min = 1 cm, senkrecht 1° C = 2 cm. Liest man dann die Temperaturen bei x und y auf Fünftel-Millimeter ab, was sicher geht, so erhält man noch Hundertstel-Grade für die Differenz, also bei 3° Temperaturanstieg nur eine Unsicherheit von 0,3%. Bei geringerem Temperaturanstieg wäre der Maßstab der Temperaturen entsprechend größer zu wählen. Eine Beobachtung der Umgebungs-

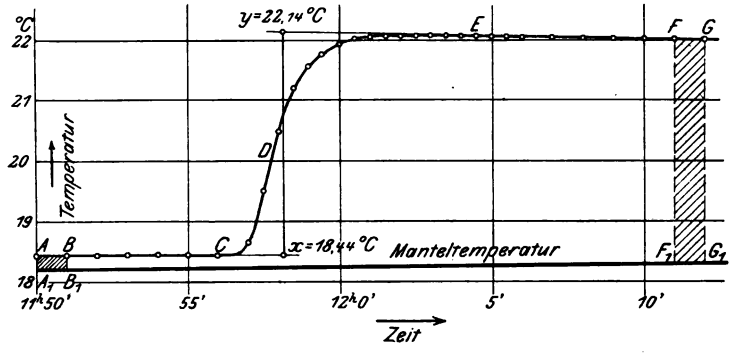


Fig. 283. Diagramm zur Ermittlung der berichtigten Temperatursteigerung.

temperatur ist bei dieser Art der Auswertung überflüssig. Trotzdem findet sich natürlich die Manteltemperatur im Endergebnis berücksichtigt.

Als *Beispiel* für den gesamten Gang der Auswertung möge das Folgende dienen. Das Steinkohlenbrikett wog 1,228 g; das Gewicht des Zünddrahtes betrug 0,030 g, woraus sich das Nettokohlegewicht zu 1,198 g ergibt. Die Temperaturbeobachtungen wurden alle Minuten und nach der Zündung alle halben Minuten gemacht, es ergab sich das in Fig. 283 dargestellte, schon besprochene Schaubild und eine berichtigte Temperatursteigerung von 22,14 — 18,44 = 3,70°. Es waren 2 kg Wasser ins Kalorimeter gefüllt, dessen Wasserwert mit 0,350 kg bekannt war; also wurden 2,350 kg Wasserwert erwärmt. Die entwickelte Wärmemenge berechnet sich zu $2{,}350 \cdot 3{,}70 = 8{,}70$ WE. Von dieser Wärmemenge entstammten dem Eisendraht $0{,}03 \cdot 1{,}6 = 0{,}05$ WE, also entstammten der Kohle 8,65 WE. Der obere Heizwert ist nun

$$\frac{8{,}65}{1{,}198} = 7{,}220 \frac{\text{WE}}{\text{g}} = 7220 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}.$$

Zur Bestimmung des unteren Heizwertes wurde die Gewichtszunahme der Chlorkalziumvorlage bestimmt. Die Vorlage wog nach

dem Versuch 61,886 g, vor dem Versuch 61,254 g, nahm also um 0,632 g Wasser zu. Es entwickelt sich also $\frac{0{,}632}{1{,}198} = 0{,}528 \frac{\text{g Wasser}}{\text{g Kohle}}$ $= 0{,}528 \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Kohle}}$. Dem entspricht $0{,}528 \cdot 600 = 317$ WE pro kg Kohle; der untere Heizwert ist $7220 - 317 \backsim 6900$ WE/kg.

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die *Entnahme und Behandlung der Probe* mit das Wichtigste an der ganzen Untersuchung ist. Das bezieht sich einerseits darauf, daß die entnommene Probe den Durchschnitt der zu untersuchenden Kohle darstellen muß, andererseits darauf, daß die Probe nach der Entnahme sich nicht irgendwie verändert haben darf; besonders darf sie nicht Wasser verloren haben, ohne daß dies besonders gemessen wäre.

Man entnimmt die Probe meist so, daß man bei einem längeren Versuch von jedem der herbeigeschafften Kohlenkarren eine Schaufel zurücklegt; am Schluß des Versuches wird dieser ganze Probehaufen grob zerkleinert, gut durchgemischt, dann flach ausgebreitet und durch einen kreuzweise geführten Strich mit der Schaufel in vier etwa gleiche Teile geteilt. Größere Steine in der Kohle sind vorher so weit zu zerkleinern, daß man auf etwa gleichmäßige Verteilung derselben auf die vier Viertel rechnen kann. Es werden dann zwei diagonal gegenüberliegende Teile, im ganzen also eine Hälfte entnommen, so jedoch, daß nicht der zu dieser Hälfte gehörige Grus zurückbleibt; die andere Hälfte wird fortgetan. Diese Hälfte wird weiter zerkleinert, gemischt, ausgebreitet und abgeteilt, und so fort, bis man 5 oder 10 kg ins Laboratorium schickt.

Was die Veränderlichkeit anbetrifft, so ist die Steinkohle wenig empfindlich; immerhin verwahre man die von den einzelnen Karren genommenen Mengen in einer bedeckten Kiste, bis man die Mischung vornimmt, und löte die endgültige Probe zur Versendung oder Aufbewahrung in Blechbüchsen oder tue sie in Glasflaschen. Sehr veränderlich ist stark wasserhaltige Braunkohle, Torf, Holz. Man beobachte einmal, wie es nicht möglich ist, manche Braunkohlensorte an der Luft zu wägen, weil sie von Minute zu Minute leichter wird. Hier muß man das Mischen und Zerkleinern unterlassen und sich mit dem Aussuchen von Stücken begnügen, die man sofort luftdicht aufhebt.

Da so *nasse Kohle* gar nicht oder schlecht in der Bombe verbrennt, so läßt man sie erst an der Luft trocknen, ermittelt aber den prozentualen Gewichtsverlust beim Trocknen. Das Wasser, welches die Kohle in dieser Weise verloren hat, wird für die Berechnung des unteren Heizwertes ebenso in Betracht zu ziehen sein, wie das später aus der Bombe herauskommende. Diese Berücksichtigung geschieht etwa wie folgt: 13,52 kg Braunkohle trockneten an der Luft in 2 bis 3 Tagen auf 8,91 kg aus; Gewichtsverlust 4,61 kg = 51,7% der verbliebenen Kohle. Aus der trockenen Kohle wird nun 1,021 g verbrannt, liefert einen oberen Heizwert von 3041 WE/kg, und insgesamt 0,670 g Wasser. Hätten wir die Kohle nicht getrocknet gehabt, so wäre die gleiche Kohlenmenge 51,7% schwerer gewesen, hätte also 0,528 g mehr gewogen, aber auch

0,528 g mehr Wasser gegeben. Der obere Heizwert der ursprünglichen Kohle war $3041 \cdot \frac{100}{151,7} = 2005 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}$. 1 g Kohle hätte dann $\frac{0,670 + 0,528}{1,021 + 0,528} = 0,774$ g Wasser gegeben; deren latente Wärme ist 464 gr cal, und der untere Heizwert der ursprünglichen Kohle ist $2005 - 464 = 1541$ WE/kg.

Zur Einführung in die Bombe umwickelt man Braunkohle mit Eisendraht, den man an den Polen befestigt. Steinkohle stößt man ganz fein und drückt in einer zur Bombe gehörigen Presse ein Brikett daraus, in dem der Eisendraht eingebettet wird. Dieser dient dann, wie erwähnt, auch zur Zündung. Koks oder Anthrazit, die nicht zusammenhaften, kann man am besten in Form von Körnern von 1 bis 2 mm Durchmesser im Platintiegel verbrennen, oder man formt ein Brikett unter Zuhilfenahme von Sirup oder Teer. Ganz arme Schlacken, die nicht für sich brennen, muß man mit besser brennbaren Stoffen mischen. In beiden Fällen muß man natürlich die Wärmeerzeugung der Beimischung berücksichtigen, dazu also deren Heizwert und das Mengenverhältnis der Mischung kennen.

Nur bei sorgsamster Beobachtung aller Vorsichtsmaßregeln wird man mit der Bombe einigermaßen zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Man wird bald bemerken, daß die Arbeit mit der Bombe schwierig ist und viel Übung erfordert. Ihrer ganzen Art nach gehört sie mehr ins physikalisch-chemische als ins technische Gebiet. Oft wird man deshalb vorziehen, die Kohlenprobe an eine Stelle zu schicken, die speziell auf Heizwertbestimmungen eingerichtet sind — das sind die chemisch-technischen Institute der Hochschulen, die Dampfkesselüberwachungsvereine und Privatinstitute.

Statt in der Bombe mit komprimiertem Sauerstoff hat man auch versucht, die *Verbrennung in einem Strome Sauerstoffs von Atmosphärenspannung* vor sich gehen zu lassen. Es gibt zahlreiche Apparate, die für solches Arbeiten eingerichtet sind, und für leicht verbrennliche Brennstoffe mögen sie auch gute Dienste tun; für Kohle indessen, die schwere Kohlenwasserstoffe enthält, scheinen sie nicht brauchbar zu sein: es tritt Rußbildung ein, und dann wird nicht der ganze Heizwert frei. — Eine andere Umgehung der unbequemen Bombe ist das *Parr-Kalorimeter*; in ein bombenähnliches Gefäß wird die Kohle in inniger Mischung mit einem sauerstoffreichen Salz, besonders Natriumperoxyd, gebracht. Die Verbrennung geschieht, indem jenes Salz seinen Sauerstoff hergibt, bei Atmosphärenspannung, die Zündung durch Einwerfen eines glühenden Kupferspanes durch ein Rückschlagventil; die freiwerdende Wärmemenge wird wie bei der Bombe in einem Kalorimeter gemessen. Diese freiwerdende Wärmemenge ist aber nicht der Heizwert des Brennstoffes, da nicht CO_2 und H_2O freibleiben, sondern Verbindungen entstehen, deren Bildungswärme man nun mißt. Dies durch Einführung eines Koeffizienten zu berücksichtigen, ist ein unsicherer Notbehelf, da es von vielen Umständen abhängt, welche Verbindungen bei der komplizierten Reaktion entstehen.

112. Zusammensetzung der Kohle. Im Anschluß an die Heizwertbestimmung pflegt man oft noch eine Untersuchung der Kohle auf ihre wesentliche Zusammensetzung zu machen; besprochen werde kurz die Bestimmung des Wassergehaltes, ferner des Gehaltes an brennbarer Substanz, an Asche, an Kohlenstoff.

Bei Bestimmung des Wassergehaltes kann man schrittweise vorgehen, indem man die Kohle zunächst etwa 14 Tage unbedeckt und ausgebreitet im warmen Zimmer stehen läßt und dann den eingetretenen Gewichtsverlust feststellt. Die Kohle ist nach dieser Zeit als lufttrocken zu betrachten. Den Gewichtsverlust bezeichnet man wohl als die *grobe Feuchtigkeit* der Kohle.

Die so behandelte Kohle enthält immerhin noch Wasser, auch abgesehen davon, daß in ihren festen Bestandteilen Wasserstoff und Sauerstoff vorhanden sind, die man als zu Wasser vereinigt sich vorstellen kann. Wenn man nun eine kleinere Menge der lufttrockenen Kohle in einem Porzellantiegel eine Stunde lang sehr vorsichtig im Vakuum erhitzt, so entweicht das noch vorhandene Wasser. Der Rest heißt *trockene Substanz*. Unter *hygroskopischem Wasser* versteht man den gesamten bisher eingetretenen Gewichtsverlust, also einschließlich der schon vorher bestimmten groben Feuchtigkeit. Wenn man ohne Anwendung von Vakuum erhitzt, so kann man sich leicht durch den Geruch überzeugen, daß nicht nur Wasser, sondern auch andere Substanz selbst bei vorsichtigem Erhitzen auf nur 110° entweicht.

Beim Erhitzen in einem dicht verschlossenen Tiegel, einige Minuten über dem Bunsenbrenner zur Rotglut und dann gleich weiter und ebensolange vor dem Lötrohr zur Weißglut, entweicht nun die *flüchtige Substanz* und zurück bleibt eine Art *Koks*, verschieden nach der Kohlenart. Doch sei ausdrücklich bemerkt, daß der Rückstand nicht mehr allen Kohlenstoff der Kohle enthält, weil ja die entweichenden Gase zumeist Kohlenwasserstoffe sind. Diese Bestimmung wird für uns meist wenig Wert haben. Wir können sie daher nach Bedarf auslassen und direkt den Aschengehalt bestimmen.

Den *Aschengehalt* bestimmt man, indem man den Rückstand, das ist also entweder die trockene Substanz oder den Koks, in offenem Tiegel unter Umrühren so lange stark erhitzt, bis keine Gewichtsverminderung mehr stattfindet; der Rest ist Asche, das heißt unverbrennlich.

Wie man sieht, erhält man bei dieser Folge von Untersuchungen den gesamten *Kohlenstoffgehalt* der Kohle nicht. Man wünscht ihn gelegentlich zu kennen, weil man mit seiner Hilfe die Menge der Rauchgase und daher die Essenverluste bestimmen kann (S. 380). — Man ermittelt den Gesamtkohlenstoff am einfachsten gleichzeitig mit dem unteren Heizwert. Die Verbrennungsprodukte der Bombe sollen ein Chlorkalziumrohr durchlaufen, um das Verbrennungswasser zu bestimmen (S. 353, Fig. 282). Das so getrocknete Gas läßt man nun noch durch einen Kaliapparat, dann nochmal durch ein Chlorkalziumrohr gehen und nun erst in den saugenden Aspirator treten. Der Kaliapparat enthält Kalilauge, durch die die aus der Bombe austretenden Verbrennungsprodukte hindurchperlen müssen; passende Apparate sind billig fertig

zu haben. Im Kaliapparat wird die in der Bombe gebildete Kohlensäure absorbiert; dadurch nimmt er an Gewicht zu. Gleichzeitig aber entführt ihm das durchströmende Gas Feuchtigkeit; diese zurückzuhalten ist das zweite Chlorkalziumrohr nötig. Die Gewichtszunahme der vorher schon gewogenen Kombination aus Kali- und zweitem Chlorkalziumrohr ist also die aus dem Kohlebrikett entwickelte CO_2. Wegen der Atomgewichte sind je 44 Teile CO_2 entstanden aus 12 Teilen C; daher kann man berechnen, wieviel C im Kohlebrikett enthalten war. So war bei der Heizwertbestimmung, deren Ergebnisse auf S. 355 mitgeteilt wurden, auch noch die Kohlenstoffbestimmung gemacht worden. Die Kalivorlage wog 81,83 g nach dem Durchtreiben des Gases, vorher wog sie 78,62 g. Der Unterschied von 3,21 g entspricht $3{,}21 \cdot \frac{12}{44} = 0{,}876$ g C, die in 1,198 g Kohle enthalten war; die Kohle enthielt $\frac{0{,}876}{1{,}198} \cdot 100 = 73{,}1\%$ Kohlenstoff.

Auch der *Wasserstoffgehalt* des Brennstoffes ist verhältnismäßig einfach zu berechnen. Das Wasser nämlich, welches aus der Krökerschen Bombe bei Bestimmung des unteren Heizwertes entwich, war zum Teil schon hygroskopisch im Brennstoff enthalten — diesen Prozentsatz zu bestimmen, ist nach dem soeben Gesagten ausführbar — zum Teil ist es erst aus dem Wasserstoff entstanden. Dieser letztere Teil ist die Differenz zwischen dem gesamten Verbrennungswasser und dem hygroskopischen Wasser des Brennstoffes. Daraus folgt der Wasserstoffgehalt der Kohle; er ist ein Neuntel jener Differenz.

Zu bemerken bleibt wieder, daß sich der Techniker bei solchen Untersuchungen auf chemisches Gebiet begibt, auf dem er voraussichtlich zunächst Lehrgeld wird zahlen müssen. Oft wird man vorziehen, die Kohle von einem chemischen Institut untersuchen zu lassen.

Die Zusammensetzung des Brennstoffes drückt man in Prozenten entweder der ursprünglichen oder der lufttrockenen Kohle aus. Es erfordert Aufmerksamkeit, will man nicht beim Berechnen Verwirrung anrichten, indem man bald diesen, bald jenen Wert als 100% einführt.

113. Gasförmige Brennstoffe. Das *Junkerssche Kalorimeter* für gasförmige Brennstoffe ist in Fig. 284 dargestellt. Im Innern des Kalorimeters verbrennt das zu untersuchende Gas; seine Menge G mißt man mittels einer Gasuhr. Die Verbrennungsgase gehen aufwärts, dann durch ein Bündel von Rohren wieder abwärts und entweichen bei A, wo man ihre Temperatur t_r messen kann. Sie haben inzwischen die erzeugte Wärme an Wasser abgegeben, welches das genannte Rohrbündel außen umspült. Dieses Kühlwasser durchläuft in gleichmäßigem Strome den Apparat; man mißt mit Hilfe der Thermometer t_e und t_a seine Ein- und Austrittstemperatur. Man beobachtet durch Wägen oder mit Mensur die Wassermenge W, die durch das Kalorimeter fließt, während eine bestimmte Gasmenge, meist 3 l oder 30 l, verbrennt. Ist G_o das aus G zu berechnende reduzierte Gasvolumen, so ist der obere Heizwert

$$\mathfrak{H}_o = \frac{W \cdot (t_a - t_e)}{G_o} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Die Verbrennungsgase sollen bei A mit Zimmertemperatur entweichen.

Im einzelnen ist über das Kalorimeter zu bemerken: Der gleichmäßige Wasserstrom wird dadurch ermöglicht, daß das Wasser unter dem konstanten Druck von der Höhe h steht; bei x nämlich steht das ablaufende Wasser stets bis zur Kante des Trichters; bei y steht das zulaufende bis an die Kante s des inneren Ringes, wenn man dafür sorgt, daß etwas Wasser im Überschuß durch z zufließt; der Überschuß läuft über die Kante s fort. Steht also das Wasser unter konstantem Druck, so kann man mit dem Hahne H die Durchflußmenge regeln, und sie wird unabhängig von Schwankungen des Leitungsdruckes sein. — Bevor das Wasser an das Thermometer t_a kommt, wird es gründlich durchgemischt durch eine Anzahl flacher Kappen, die mit kreuzweise versetzten Schlitzen versehen sind. — Der Brenner ist ein Bunsenbrenner, dessen Luftschlitze man durch einen Stellring mehr oder weniger schließen kann. Auf die Wärmeerzeugung ist es allerdings ohne Einfluß, ob die Verbrennung mit leuchtender Flamme erfolgt, sofern nur nicht Rußbildung stattfindet. An den kalten Flächen des Kalorimeters läßt sich aber Rußbildung nur bei blauer Flamme vermeiden.

Es wird wohl angegeben, man solle den Rumfordschen Kunstgriff anwenden, der darin besteht, so einzuregulieren, daß die Zimmertemperatur gerade mitten zwischen Zu- und Abflußtemperatur des Kühlwassers liegt. Dann vermiede man am besten Strahlungsverluste. Doch gehen bei diesem Verfahren stets die Gase zu kalt ab, sie pflegen die Temperatur des zufließenden Kühlwassers anzunehmen. Besser ist es, das Kühlwasser mit Zimmertemperatur zufließen zu lassen. Gegen Strahlung ist das Kalorimeter durch einen umgebenden ruhenden Luftmantel möglichst geschützt, der in der Figur fortgelassen ist; auch die Nickelpolitur des Mantels dient der Verminderung der Strahlung und sollte gut blank gehalten werden. — Der Strahlung wegen arbeitet man besser mit großer Wassermenge und geringer Temperaturzunahme desselben als umgekehrt.

Die bisherige Messung ergab uns den oberen Heizwert. Um den unteren zu finden, ist bei c ein Stutzen angebracht, aus dem man das Kondenswasser abziehen kann, das sich in dem Rohrbündel aus den abgekühlten Gasen niederschlägt. Wir haben dieses Kondenswasser für die gleiche Zeit zu messen wie Kühlwasser und Gas und die aus 1 cbm $\binom{0}{760}$ Gas gebildete Kondenswassermenge w_1 auszurechnen. Das Produkt $600 \cdot w_1$ stellt die beim Kondensieren frei gewordene Wärme dar, die in Abzug zu bringen ist. Der untere Heizwert ist

$$\mathfrak{H}_u = \mathfrak{H}_o - 600 \cdot w_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Da indessen die Menge des Kondenswassers aus 3 l Gas nur wenige Gramm beträgt, so wäre die Kondensatmessung unzuverlässig. Es bleiben Tropfen im Kalorimeter hängen und das hat schon wesentlichen Einfluß. Man kann sich für die eigentliche Kalorimetrierung gut mit 3 l begnügen, muß aber die Kondenswassermessung auf mehr, etwa 15 l Gas ausdehnen und umrechnen.

Ein *Beispiel* einer Auswertung der Beobachtungsergebnisse lautet etwa wie folgt: Während durch die Gasuhr 10 l Gas gingen, wurden 4,96 kg Wasser aufgefangen (gewogen). Als Mittelwert aus Ablesungen,

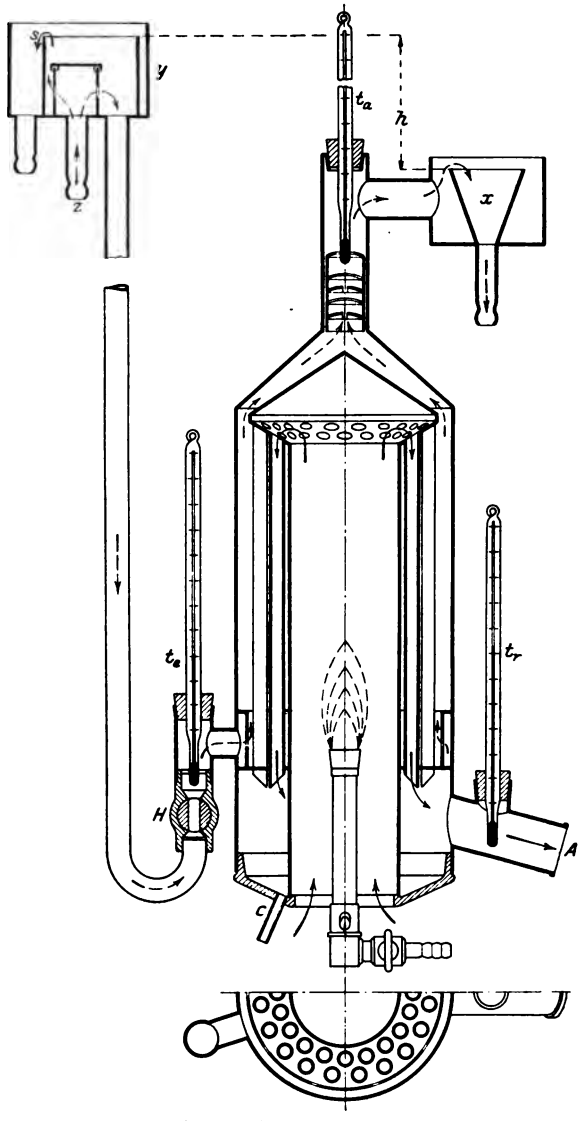


Fig. 284. Junkers-Kalorimeter.

die immer nach Durchgang von 1 l durch die Gasuhr gemacht wurden, ergab sich die Eintrittstemperatur des Kühlwassers 15,17° und die Austrittstemperatur 25,33°. Also sind $4{,}96 \cdot 10{,}16 = 50{,}4$ WE erzeugt worden. Diese Wärmemenge ist erzeugt worden von 10 l Gas, die aber

bei ihrer Messung 17,5° C hatten und unter 14 mm WS Überdruck standen. BStd 741 mm QuS, also hatte das Gas 742 mm QuS absolute Spannung. Sein reduziertes Volumen war $10 \cdot \frac{273}{273+17,5} \cdot \frac{742}{760} = 9,18\ 1\ \left(\frac{0}{760}\right)$. Daher hat das Gas einen oberen Heizwert von $\frac{50,5}{9,18} = 5,49\ \frac{\text{WE}}{\text{ltr}}$ $= 5490$ WE/cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$.

Zur Bestimmung des unteren Heizwertes wurde das Kondenswasser aufgefangen, bis 30 l durch die Gasuhr gegangen waren; dann wurden 29,5 g gewogen. Die 30 l Gas bedeuten $3 \cdot 9,18 = 27,54$ l im reduzierten Zustande, also entstehen aus dem Kubikmeter Gas $\frac{29,6 \cdot 1000}{27,45}$ $= 1075$ g $= 1,075$ kg Wasser, die beim Kondensieren $1,075 \cdot 600$ $= 646$ WE haben frei werden lassen. Unterer Heizwert $5490 - 646$ ~ 4840 WE/cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$.

Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat die *Genauigkeit des Junkers-Kalorimeters* geprüft, indem sie mit seiner Hilfe den Heizwert von Wasserstoff feststellte, der auch anderweit bekannt ist. Das Junkers-Kalorimeter ergab den Heizwert um 0,4% zu hoch. Mag auch bei den mit nur üblicher Sorgfalt angestellten Versuchen die Genauigkeit nicht ganz so groß sein, so ist sie jedenfalls für technische Zwecke ausreichend. Daß man aber auf dichte Verbindungen sieht, um Gasverluste zu vermeiden, daß man ferner eine richtig gehende Gasuhr verwenden muß, dies und ähnliches ist selbstverständlich. Die Gasuhr sei noch besonderer Aufmerksamkeit empfohlen. Außerdem erwähnen wir wiederholt, daß der Heizwert von dem reduzierten Gasvolumen abhängt: Druck und Temperatur sind also zu messen.

Man hört wohl anführen, eine *Fehlerquelle* liege darin, daß die Abgase gesättigt mit Feuchtigkeit aus dem Kalorimeter gehen, während die Verbrennungsluft nicht damit gesättigt war; daher werde die gemessene Menge Verbrennungswasser zu klein sein. Das letztere ist richtig, ein Fehler bei der Bestimmung des unteren Heizwertes tritt aber nicht auf. Der obere Heizwert wird um so viel (1—2%) zu niedrig gefunden, wie dem Mehrgehalt an Feuchtigkeit entspricht. Dieser Fehler gleicht sich wieder aus, weil man zu wenig Verbrennungswasser mißt. Sieht man also den unteren Heizwert als maßgebend an, so tritt kein Fehler auf.

Ein Fehler entsteht indes stets dadurch, daß das Gas beim Messen und beim Verbrennen mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Daher hat man, wenn man 3 l an der Gasuhr ablas, zwar auch 3 l dem Brenner zugeführt, aber diese 3 l waren teils Wasserdampf und nur zum anderen Teil Leuchtgas. Bei 20° C hat der Wasserdampf eine Spannung von 17 mm QuS. Bei 760 mm Gesamtspannung des feuchten Gases würden also 2,2% des Gasvolumens aus Feuchtigkeit bestehen, und nur die verbleibenden 97,8% sind Gas und erzeugen wirklich Wärme. Der Heizwert des Gases selbst ist also größer, als er erscheint. — Ob man nun durch eine Umrechnung den Heizwert auf trockenes Gas bezieht, kommt auf den

Zweck der Untersuchung an; auch im praktischen Betriebe hat ja das Gas die Gasuhr passiert und enthält Feuchtigkeit, und gelegentlich wird man das bei der Kalorimetrierung nachahmen wollen. Nur muß man dafür sorgen, daß das Gas beide Male den gleichen Feuchtigkeitsgehalt, also beide Male gleiche Temperatur hat, wenn es die Gasuhr passiert. Jedenfalls sieht man aber, daß Kalorimetrierungen verschiedene Ergebnisse haben werden, je nach der Temperatur des Gases in der Gasuhr. Die einfache Reduktion des Gasvolumens auf 0° und 760 mm, nach dem Gesetz von Mariotte-Gay-Lussac, schafft diese Unterschiede nicht fort. Dazu müßte man auf trockenes Gas von 0° und 760 mm reduzieren, und das ist stets das wissenschaftlich Korrekte.

An *Sonderausrüstungen* des Junkers-Kalorimeters seien folgende erwähnt: Um das unter Vakuum stehende *Kraftgas* einer Sauggasanlage zu kalorimetrieren, das natürlich nicht freiwillig in den Brenner eintritt, kann man mittels eines aus zwei großen Flaschen (Säureballons) hergestellten Aspirators (S. 353) eine größere Menge ansaugen, und dann durch Umstellen der Flaschen den nötigen Druck erzeugen. Diese Methode hat noch den Vorteil, daß man bei langsamem und langem Ansaugen eine Mischung aus Gas der verschiedenen Zeiten erhält; die Kalorimetrierung ergibt gleich den durchschnittlichen Heizwert; bei der wechselnden Zusammensetzung von Hochofengasen ist das wertvoll. Die Veränderung, die das Gas durch Absorption einzelner Bestandteile im Aspiratorwasser erfährt, dürfte stets gering sein und verschwindet bei mehrfacher Benutzung des gleichen Wassers. — Es werden auch besondere Einrichtungen zur kontinuierlichen Unterdrucksetzung von Sauggas geliefert.

Wo die Spannung des zu untersuchenden Gases schwankt, wie das bei Kraftgasanlagen und bei Gichtgas der Fall ist, da muß man zur Kalorimetrierung und auch zur Messung die Spannung des verbrennenden Gases konstant halten. Sonst ist ein Beharrungszustand nicht zu erreichen. Dem Zweck dient ein *Druckregler*, in dem ein Drosselventil unter dem Einfluß einer Schwimmerglocke steht, so daß auf konstante Spannung hinter dem Regler gedrosselt wird; die Höhe dieser Spannung ändert sich mit der Belastung der Schwimmerglocke.

114. Flüssige Brennstoffe; Verbandsformel. Für flüssige Brennstoffe hat man das Junkers-Kalorimeter nutzbar gemacht, indem man einen Brenner besonderer Bauart, die durch vorgängige Vergasung rußfreie Verbrennung sichern soll und dem der Brennstoff durch Druckluft zugeführt wird, an einer Seite einer Wage aufhängt. Man führt nun die Flamme ins Junkers-Kalorimeter ein, reguliert das Kalorimeter nach Bedarf und wartet den Beharrungszustand ab. Beim Verbrennen der Flüssigkeit wird die Seite der Wage, an welcher der Brenner hängt, allmählich leichter; hatte man den gefüllten Brenner nicht ganz austariert, so wird zu einem gewissen Zeitpunkt die Brennerseite die leichtere werden und der Wagebalken herüberschlagen. Wenn dabei die Zunge der Wage durch den Nullpunkt geht, beginnt man die Wassermessung sowie die Temperaturablesungen. Man

entfernt nun eine best mmte Anzahl von Grammen von der Wage: die Wage wird abermals durch den Nullpunkt gehen, sobald die gleiche Anzahl von Grammen auf der Brennerseite verbrannt ist; in diesem Moment schließt man die Wassermessung ab. — Mit Hilfe der so ermittelten Brennstoffmenge berechnet man den Heizwert genau wie früher aus der Gasmenge. Auch die Messung des Kondenswassers und die Berechnung des unteren Heizwertes ist die gleiche. — Doch ist das Arbeiten mit dem erwähnten Brenner nicht sehr bequem, wenigstens bei schwer vergasbaren Brennstoffen.

Man kann flüssige Brennstoffe auch in der Bombe kalorimetrieren, indem man sie von Watte aufsaugen läßt und in die Watte den Zünddraht bettet. Um rußfreie, überhaupt vollkommene Verbrennung zu erzielen, wird man erst je nach dem Brennstoff die richtigen Verhältnisse ausproben müssen. Der Heizwert der Watte (Zellulose 4210 WE/kg) ist zu berücksichtigen.

Die Kalorimetrierung gewisser flüssiger Brennstoffe bietet große Schwierigkeiten, und man wird daher bei ihnen eher als bei festen und gasförmigen dazu kommen, gelegentlich den Heizwert lieber aus der Zusammensetzung des Brennstoffes rechnerisch zu bestimmen.

Für chemisch definierte Brennstoffe, wie Spiritus oder Benzol, kann man den Heizwert Tabellen entnehmen, nachdem man (für Spiritus) den Wassergehalt durch Messen des spezifischen Gewichtes und auch unter Zuhilfenahme von Tabellen bestimmt hat. Die durchzuführenden Rechnungen sind nicht immer ganz einfach; auch sind für viele Fälle die Zahlengrundlagen nur unvollständig vorhanden. So müßte man bei Spiritus bedenken, daß nur der Alkoholgehalt Wärme liefert, der Wassergehalt aber nicht nur keinen Anteil an der Wärmelieferung nimmt, sondern sogar — bei Berechnung des unteren Heizwertes — Wärme latent entführt; auch wäre noch zu berücksichtigen, daß bei der Verdünnung von absolutem Alkohol mit Wasser bereits eine Verdünnungswärme frei wird, die beim Verbrennen nicht nochmals in die Erscheinung tritt.

Für chemisch nicht definierte Stoffe, wie Benzin oder Petroleum, wird man auf die *Verbandsformel* (aufgestellt vom Internationalen Verband der Dampfkessel-Überwachungsvereine) zurückgreifen müssen, die auch für feste Brennstoffe benutzt werden kann. Nach ihr soll der Heizwert eines Brennstoffes, dessen Gehalt an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel und Wasser durch eine Elementaranalyse bestimmt und durch die Zahlen c, h, o, s und w gegeben sei, bezogen auf 1 kg Brennstoff, wie folgt zu berechnen sein. Es ist

$$\mathfrak{H}_o = 8100 \cdot c + 34\,000 \cdot (h - \tfrac{1}{8} \cdot o) + 2500 \cdot s \text{ WE/kg} \quad . \quad . \quad (5)$$

Hierin sind die Zahlen 8100, 34000 und 2500 die Heizwerte der betreffenden Elemente; $\frac{1}{8}\,o$ ist die Wasserstoffmenge, die zur Bindung des im Brennstoff enthaltenen Sauerstoffes nötig ist und deren Verbrennungswärme daher nicht nochmals frei wird. — Der untere Heizwert ist

$$\mathfrak{H}_u = 8100 \cdot c + 29\,000 \cdot (h - \tfrac{1}{8} \cdot o) + 2500 \cdot s - 600 \cdot w \quad . \quad (5a)$$

Es ist hier nur das hygroskopische Wasser w und nicht etwa das gesamte

in den Verbrennungsgasen enthaltene Wasser $W = w + 9\,h$ in Ansatz zu bringen, weil 29 000 WE/kg bereits der untere Heizwert des Wasserstoffes ist.

So wird insbesondere in den letzten Jahren der *Heizwert von Treibölen* meist nach der Verbandsformel berechnet, weil die direkte Bestimmung manchen Schwierigkeiten begegnet. Wenn zum *Beispiel* die von einem Chemiker auszuführende Elementaranalyse ergeben hat, daß das Treiböl 87,7 % C und 6,67 % H enthält, so würde man den unteren Heizwert anzusetzen haben mit

$$8100 \cdot 0{,}877 + 29\,000 \cdot 0{,}0667 = 7110 + 1930 = 9040 \text{ WE}.$$

Die Verbandsformel (5a) behandelt den Verbrennungsvorgang so, als wenn die im Brennstoff vorhandenen Elemente als solche darin wären, und als ob nur der Sauerstoffgehalt bereits an Wasserstoff gebunden wäre. Das trifft nicht zu; die Elemente pflegen in Form komplizierter Verbindungen, insbesondere als Kohlenwasserstoffe verschiedenster Art, darin enthalten zu sein, und deren Heizwert ist nicht gleich der Summe der Heizwerte der Elemente, sondern um die eigene Bildungswärme davon verschieden. Daher kann die Verbandsformel keine genauen Werte liefern; immerhin sind ihre Ergebnisse meist nicht allzusehr von dem kalorimetrisch ermittelten Heizwert verschieden; die Abweichung beträgt selten mehr als 2 bis 3%.

In den für Untersuchungen an Dampfkesseln und an Verbrennungsmaschinen und Gasgeneratoren aufgestellten Normen des Vereines deutscher Ingenieure findet sich deshalb die Bestimmung: „Der Heizwert des Brennstoffes ist kalorimetrisch zu ermitteln"; die Verwendung der Verbandsformel ist zur „angenäherten" Berechnung zugelassen.

XIV. Gasanalyse.

115. Allgemeines. *Aufgabe* der maschinentechnischen Gasanalyse ist die Untersuchung der Verbrennungsprodukte einer Feuerungsanlage oder eines Verbrennungsmotors auf ihren Gehalt an Kohlensäure CO_2, Kohlenoxyd CO und Sauerstoff O; oder aber die Untersuchung von Nutzgasen, die meist zum Betrieb von Gasmaschinen (Kraftgas), gelegentlich zum Feuern dienen sollen, auf Wasserstoff H, Kohlenoxyd CO, Methan CH_4, schwere Kohlenwasserstoffe und auf die in diesem Fall unerwünschten Beimengungen von CO_2 und O.

Zweck der Gasanalyse ist die Kontrolle der Verbrennung oder Gaserzeugung, auch wohl die Feststellung der durch die Essengase bewirkten Verluste.

Das *Verfahren* bei der Analyse der Rauchgase oder der Abgase einer Gasmaschine ist das folgende: Man sperrt ein bestimmtes Volumen der Rauchgase ab — häufig sind es 100 ccm. Diese Gasmenge bringt man mit einem Absorptionsmittel für Kohlensäure, meist mit Kali-

lauge, in Berührung und stellt dann fest, um wieviel sich die Gasmenge verringert hat: der Minderbetrag war CO_2. Die verbleibende Gasmenge bringt man nun mit einem Absorptionsmittel für Sauerstoff in Berührung, meist mit Pyrogallussäure, und mißt dann wieder den Volumenverlust: dieser zweite Volumenverlust war O. Häufig begnügt man sich mit diesen beiden Feststellungen und sieht den Rest dann einfach als Stickstoff an. Sonst aber bringt man das noch verbliebene Gas mit Kupferchlorürlösung in Berührung; der Volumenverlust hierbei ist Kohlenoxyd — und man betrachtet den Rest als Stickstoff. Kohlenoxyd ist meist wenig oder gar nicht vorhanden.

Wenn in Nutzgasen andere Bestandteile vorhanden sind, so muß man entsprechend weitere Absorptionsmittel oder Verbrennungsmethoden anwenden.

Bei allen Volumenmessungen muß das Gas unter der gleichen Spannung stehen und die gleiche Temperatur haben — welche, ist gleichgültig, da es nur auf den prozentualen Gehalt ankommt und alle Gase gleich stark durch Temperatur und Spannung beeinflußt werden. Die abgelesenen Kubikzentimeter sind zugleich Prozente des ursprünglichen Gasvolumens, wenn man 100 ccm abgesperrt hatte.

116. Luftüberschußziffer. Die wichtigste Anwendung der Rauchgasanalyse ist die Berechnung des Luftüberschusses. Wenn die Verbrennung genau mit der erforderlichen Luftmenge durchgeführt wäre, so enthielten die Rauchgase keinen Sauerstoff. Ein Gehalt an Sauerstoff deutet also darauf, daß die zugeführte Luftmenge größer war als notwendig. Die Kenntnis des Luftüberschusses ist deshalb nützlich, weil die durch den Fuchs einer Feuerung in die Esse entweichende, verlorene Wärmemenge von ihm abhängt; sie wird bei bestimmter Fuchstemperatur um so größer sein, je größer die Gasmenge ist; auch wird durch den Luftüberschuß der Schornstein nutzlos in Anspruch genommen und reicht unter Umständen nicht aus, wo er bei guten Verbrennungsverhältnissen ausreichen würde.

Die *Luftüberschußziffer* l gibt an, wievielmal mehr Luft zur Verbrennung zugeführt worden war, als notwendig gewesen wäre; es ist $l = \frac{L}{L_o}$, wenn wir unter L die tatsächlich zugeführte, unter L_o aber die nach der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes erforderliche Luftmenge verstehen.

Die Berechnung der Luftüberschußziffer l ergibt sich aus folgender Betrachtung. Zu dem vorhandenen Sauerstoffgehalt der Rauchgase, der den überschüssigen Sauerstoff darstellt und den wir mit o bezeichnen wollen, gehört eine Stickstoffmenge $\frac{79}{21} o$, weil beide Gase im Verhältnis 79 zu 21 in der Luft gemischt sind. $\frac{79}{21} o$ ist also der überflüssigerweise vorhandene Stickstoff. Außerdem kennen wir den insgesamt vorhandenen Stickstoff; er war der Restbetrag der Analyse, den wir n nennen. Der nach der Zusammensetzung der Luft notwendige Stickstoff ist also $n - \frac{79}{21} o$, der praktisch verwendete ist n, also ist

$$l = \frac{n}{n - \frac{79}{21} o} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Für das Verhältnis der Luftmengen können wir auch das Verhältnis der Stickstoffmengen setzen. Hierbei sind unter n und o, da es ja nur auf den verhältnismäßigen Anteil beider ankommt, die Prozentsätze der betreffenden Gase im Rauchgas verstanden.

Diese Berechnungsweise für l ist nur richtig, wenn kein Kohlenoxyd in den Rauchgasen vorhanden ist. Sonst ist zu bedenken, daß bei vollkommener Verbrennung noch ein Teil des jetzt übriggebliebenen Sauerstoffes verbraucht worden wäre. Dieser Teil war also nicht überschüssig. Da 1 Raumteil Kohlenoxyd zur Verbrennung $\frac{1}{2}$ Raumteil Sauerstoff erfordert, so haben wir die gemessene Stoffmenge o um die halbe Menge des gemessenen Kohlenoxydes $\frac{1}{2}\,c$ zu vermindern, und erhalten den Luftüberschußkoeffizienten

$$l = \frac{n}{n - \frac{79}{21} \cdot (o - \frac{1}{2}\,c)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Diese Ableitung des Luftüberschußkoeffizienten ist korrekt. Einige Näherungsformeln werden wir auf S. 378 kennen lernen.

Beispiel: Ergibt sich aus einer Analyse die Zusammensetzung der Rauchgase zu 6,8% CO_2, 12,8% O, 80,4% N, so wird der Luftüberschußkoeffizient $l = \frac{80{,}4}{80{,}4 - 48{,}1} = 2{,}48$. — Aus der Analyse 11,9% CO_2, 5,8% O, 1,0% CO, also 81,3% N folgt $l = 1{,}32$.

117. Rauchgasanalyse. Um das Gas bequem messen und die Berührung mit den Absorptionsmitteln bequem veranlassen zu können, hat man eine große Reihe von Apparaten erdacht. Der *Orsat-Apparat* (Fig. 285) ist darunter derjenige, der in der Maschinentechnik am meisten Eingang gefunden hat. M ist das in Kubikzentimeter geteilte Meßgefäß, ABC sind die Absorptionsgefäße, gefüllt mit Kalilauge, Pyrogallussäure und Kupferchlorürlösung.

Jedes der Absorptionsgefäße, beispielsweise C, besteht aus einem äußeren Gefäß c_1, in dessen weiten Hals das unten offene, oben mit Schlauchanschluß versehene Gefäß c_2 mit Glasschliff eingesetzt ist. Beide zusammen bilden ein kommunizierendes Gefäßpaar. Im inneren Gefäß c_2 ist ein Bündel Glasröhren eingesetzt, das zur Erzielung einer großen Absorptionsoberfläche dient und sich auf den Becher c_3 stützt, der unten offen, oben durchlocht ist. Häufiger als diese konzentrische Anordnung der kommunizierenden Gefäße trifft man Gefäße nach Fig. 287, wo A und A_1 miteinander kommunizieren, dabei A mit Glasröhren zur Bildung der Oberfäche gefüllt ist. Die konzentrische Anordnung ergibt größere Handfestigkeit.

Die Absorptionsgefäße sind durch Hähne a, b, c absperrbar; treibt man das Gas in eines von ihnen hinüber, so entweicht die Flüssigkeit in den kommunizierenden Teil. Gummibeutel, sogenannte Scheiblersche Blasen, verhüten, daß sich z. B. die Pyrogallussäure von der Außenluft aus mit Sauerstoff sättige. Die Glasröhrenbündel bleiben beim Zurücktreten der Flüssigkeit benetzt und ergeben eine große absorbierende Oberfläche. Die Niveauflasche N, mit dem Meßgefäß M durch Gummischlauch verbunden, kann man heben und senken: bei

tiefer Stellung der Niveauflasche saugt das darin befindliche Wasser Gas ins Meßgefäß hinein; steht die Niveauflasche hoch, so wird das Gas aus dem Meßgefäß in dasjenige der Absorptionsgefäße gedrückt, dessen Hahn offen ist. Man kann also durch Senken und Heben der Niveauflasche zunächst Gas in den Apparat hineinsaugen und dieses dann abwechselnd in Berührung mit den Reagentien und zur Messung bringen. Die Verbindungsrohre zwischen den Gefäßen sind kapillar, damit ihr Volumen vernachlässigt werden kann. Das Ganze ist in einen Holzkasten mit Schiebedeckeln und mit Handgriff eingebaut und bequem transportfähig (Fig. 285 und 286).

Das erste Ansaugen geschieht durch den Doppelwegehahn *d* (Fig. 285), oder durch den Dreiwegehahn *d* (Fig. 287). Da die Leitung, die von der Entnahmestelle zum Apparat führt, zunächst voll Luft ist, so entläßt man einige angesaugte Füllungen des Meßzylinders ins Freie, bis man eine benutzt. Dazu dient der Schwanz d_1 des Doppelwegehahnes bzw. die freie Öffnung des Dreiwegehahnes. Zum Reinigen der angesaugten Gase von Ruß und Staub ist Watte im Rohr *W*. Für gleiche Temperatur bei allen Messungen sorgt ein Wassermantel um das Meßgefäß; gleiche Spannung bei allen Messungen hat man, wenn man bei der Ablesung die Niveauflasche so hält, daß ihr Wasserspiegel mit dem im Meßgefäß gleich hoch steht.

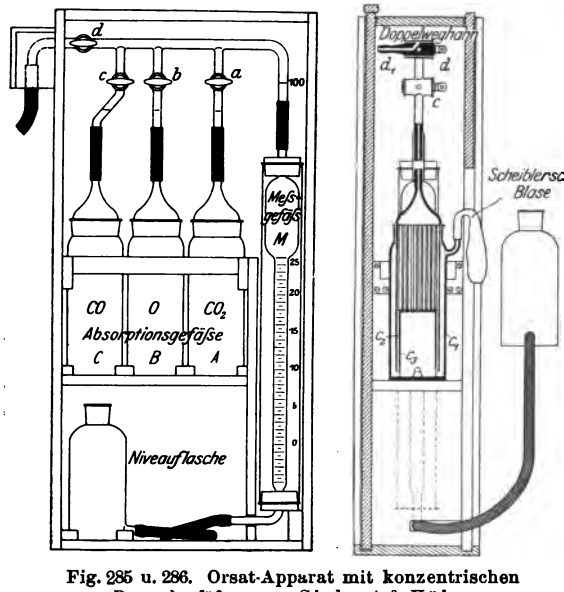


Fig. 285 u. 286. Orsat-Apparat mit konzentrischen Doppelgefäßen von Siebert & Kühn.

Es gibt auch Orsat-Apparate mit nur zwei Absorptionsgefäßen; dann wird CO nicht bestimmt.

Nach dieser Beschreibung wird folgende Anweisung für die *Handhabung* des Apparates verständlich sein.

Zunächst ist der Apparat in Ordnung zu bringen. *ABC* müssen bis zur Marke unterhalb *abc* voll Reagens sein. Ein nur halbgefülltes verbindet man mit *M* und saugt das Reagens bis zur Marke an (Niveauflasche tief). Ferner muß *M* ganz mit Wasser gefüllt werden: man drückt die Luft durch *d* ins Freie (Niveauflasche hoch). Die engen Verbindungsrohre bleiben voll Luft.

Weiterhin: Niveauflasche *N* senken, *d* so öffnen, daß Rauchgas an-

gesaugt wird („Saugstellung"), dann N heben und gleichzeitig d in „Druckstellung", so daß Angesaugtes ins Freie geht. N wieder senken, zugleich d in Saugstellung, und so fort, bis Leitung luftfrei. Man achte darauf, daß niemals d die Zuleitung mit der Außenluft verbindet, sonst tritt immer neue Luft in diese, die ja meist unter der Saugspannung des Fuchses steht. Statt die Gefäße des Apparates selbst zum Freipumpen der Zuleitung zu benutzen, kann man auch ein Gummiballgebläse an den Schwanz d_1 von d anschließen und die Leitung damit freisaugen. Schließlich endgültige Probe nehmen, indem M von oberer Marke bis Null und noch etwas weiter mit Gas gefüllt wird. Zuleitung mit Quetschhahn schließen, d schließen. Ablesung muß Null sein, wenn Spiegel in M und N gleich ist; einen Überschuß an Gas entfernt man, indem man erst bei geschlossenem Hahn d die Niveauflasche N hebt, bis die Drucksteigerung die Gase auf Null komprimiert hat, dann den Schlauch zwischen N und M nahe bei M zukneift, und nun den Überdruck aus M durch Öffnen von d ins Freie entweichen läßt. N heben, a öffnen, Gas tritt nach A; wieder zurücksaugen, wieder nach A drücken und so mehrfach „durchspülen", dabei stets aufsteigende Flüssigkeitssäule ansehen, damit sie nicht zu hoch steigt und übertritt. Schließlich Reagens in A zur Marke ansaugen, M ablesen, wobei Spiegel in M und N gleich hoch ist. Dann mit B verfahren, wie eben mit A. Die Feststellung der Gase hat in der Reihenfolge CO_2, O, CO zu geschehen, denn CO_2 wird in allen drei Reagentien absorbiert; von der Kalilauge indessen wird nur CO_2 absorbiert. Vor jeder Ablesung tut man gut, das am Glas haftende Wasser kurze Zeit sich sammeln zu lassen.

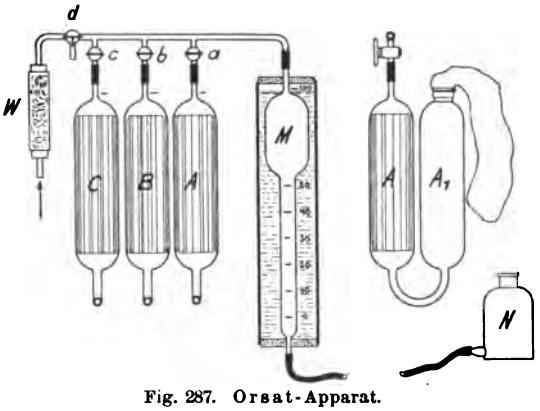


Fig. 287. Orsat-Apparat.

Da CO_2 sehr schnell, O etwas träger, CO sehr träge absorbiert wird, so hat man entsprechend verschieden oft durchzuspülen, etwa fünfmal für CO_2, zehnmal für O und zwölfmal für CO. Um zu prüfen, ob die Absorption beendet ist, kann man nach erfolgter Ablesung nochmal durchspülen und wieder ablesen; ist die Ablesung geblieben, so war die Absorption beendet, vorausgesetzt, daß die Lösungen nicht ganz erschöpft waren. Die Geschwindigkeit der Absorption hat man zu vergrößern gesucht, indem man an Stelle der einfachen Gefäße der Fig. 285 und 286 ,die nur durch ihr Glasröhrenbündel dem Gas eine große Oberfläche bieten, solche Absorptionsgefäße verwendete, bei denen das zu untersuchende Gas durch das Absorptionsmittel hindurchperlen muß. In Fig. 288 kann in der rechts gezeichneten Hahnstellung Gas ins Ab-

sorptionsgefäß eintreten; es durchläuft das mittlere gerade Rohr *d*, das nun, wie die linke Figur unten erkennen läßt, im Innern eines beiderseits offenen Spiralrohres in eine Spitze mündet. Die aus der Spitze austretenden Gasblasen werden im Spiralrohr aufwärts steigen und dabei in demselben zugleich ein Aufsteigen der Flüssigkeit bewirken; so kommen sie lange Zeit und immer mit frischer Flüssigkeit in Berührung. Das Zurücksaugen der Gase ins Meßgefäß wäre allerdings nicht möglich, wenn der Hahn einen einfachen Durchgang hätte; er ist deshalb so gebohrt, daß er nach Drehung um 180° das Rücksaugen gestattet (linke Figur oben). Die Abschlußstellung ist bei 90° Hahndrehung. Bei Anwendung solcher oder ähnlicher Gefäße soll die Absorption von CO nach zweimaligem, die von O nach dreimaligem Durchspülen sehr sicher beendet sein; für CO_2 ist ihre Verwendung zwecklos.

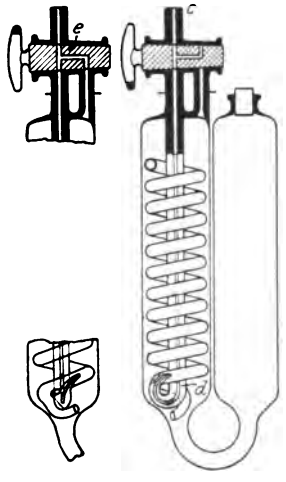


Fig. 288.
Verbessertes Absorptionsgefäß von Cornelius Heinz.

Die *Lösungen* zum Füllen des Apparates kann man aus Apparatehandlungen fertig beziehen. Doch sei auch noch die Anweisung zur Herstellung gegeben[1]):

1. Für CO_2: Kalilauge; 1 Gwt. Ätzkali (käuflich, jedoch nicht mit Alkohol gereinigt) auf 2 Gwt. Wasser. 1 ccm der Lösung kann 160 ccm CO_2 absorbieren, doch sollte man sie nur ein Viertel ausnutzen, um die völlige Absorption sicherzustellen (zulässiger Absorptionswert 40 ccm CO_2).

2. Für O_2: 5 g Pyrogallussäure heiß gelöst in 15 ccm Wasser; dazu gemischt 120 g Ätzkali, gelöst in 80 ccm Wasser. Zulässiger Absorptionswert nur $2^1/_4$ ccm O. — Wegen des geringen Absorptionswertes ist die Verwendung von Phosphorstengelchen bequemer, die unter destilliertem Wasser an Stelle der Glasrohre im Orsat-Apparat eingefüllt sind und die den Sauerstoff begierig absorbieren; Absorptionswert sehr groß; Absorption ist beendet, wenn Leuchten aufhört, oder wenn gebildeter Nebel verschwindet. Doch tritt das Leuchten nochmals etwas auf, wenn man nach erstmaligem Aufhören einmal durchspült.

3. Für CO: Salzsaure Kupferchlorürlösung: 86 g Kupferasche mit 17 g Kupferpulver (aus Kupferoxyd mit Wasserstoff reduziert) unter Schütteln in 1086 g Salzsäure, spezifisches Gewicht 1,124, einstreuen. In der Lösung muß eine vom Boden bis zur Oberfläche gehende Spirale aus Kupferdraht aufbewahrt werden; sie ist anfangs dunkel, entfärbt sich beim Stehen, wird aber durch Berührung mit Luft wieder dunkelbraun. Zulässiger Absorptionswert 4 ccm CO. — Empfehlenswerter: Ammoniakalische Kupferchlorürlösung: 250 g Ammoniumchlorid gelöst

[1]) Hempel, Gasanalytische Methoden, 1900, S. 133, 181, 183. — Winkler, Lehrbuch der technischen Gasanalyse, 1901, S. 85.

in 750 ccm Wasser, dazu (in Flasche mit dichtschließendem Gummistopfen) 200 g Kupferchlorür; diese Vorratslösung ist lange haltbar, wenn man wieder die Kupferspirale hineintut. Um sie gebrauchsfertig zu machen, ist $^1/_3$ des Volumens Ammoniakflüssigkeit, spez. Gew. 0,91, hinzuzufügen. Zulässiger Absorptionswert 4 ccm CO.

Über *Einzelheiten der Konstruktion* sei noch erwähnt, daß darauf geachtet werden sollte, daß in Fig 287 das Glasröhrenbündel nicht unten aufliegt. Es muß von einer Drahtspirale oder einem Drahtsieb (bei Kupferchlorürlösung aus Kupferdraht) so gestützt sein, daß zwischen ihm und dem U-Rohr zum kommunizierenden Gefäß ein genügend großer Ausgleichraum bleibt, damit alle Röhren des Röhrenbündels gleichmäßig Flüssigkeit hergeben oder aufnehmen. Sonst wird bei schnellem Arbeiten schon ein Übertreten von Gasblasen nach *A*, *B*, *C* stattfinden, obwohl die Flüssigkeit in *ABC* noch an sich genügt. Ferner ist der Doppelwegehahn Fig. 285 sehr viel besser als der Dreiwegehahn Fig. 287. Endlich sollte für Rauchgasanalysen der enge, mit Skala versehene Teil des Meßgefäßes höchstens 25% umfassen, nicht 50% wie bei Fig. 287, im Interesse größerer Genauigkeit und weil bei Rauchgasanalysen die Skala nur bis etwa 20% gebraucht wird.

Fehler beim Analysieren entstehen insbesondere durch undichte Hähne — dieselben sind mit Paraffin zu schmieren, nicht mit Vaselin, das verseift — oder durch undichte Gummiverbindungen; beides macht sich durch Volumenänderungen bei ganz abgesperrtem Gefäß kenntlich. Knappe Füllung der Absorptionsgefäße hat leicht zur Folge, daß zum Schluß Blasen von *A* nach A_1 (Fig. 287) treten, zumal wenn das Rohrbündel unten aufsteht; durch das Fehlen der oben verlangten Unterstützung wird man an schnellem Arbeiten sehr behindert. — Zu Fehlern neigt in jedem Fall die CO-Bestimmung mit Kupferchlorür; man wird oft finden, daß nach Anwendung der Lösung das Gasvolumen sich nicht vermindert, sondern etwas vermehrt hat. Dafür kommen mehrere Ursachen in Frage[1]). Die Bindung des CO an die Lösung ist so wenig innig, daß beim Schütteln CO abgegeben wird; es kann nun vorkommen, daß infolge einer unbeabsichtigten Erschütterung mehr CO abgegeben als absorbiert wird. Ferner bindet die Kupferchlorürlösung nicht nur CO, sondern auch Äthylen C_2H_4, das auch oft infolge unvollkommener Verbrennung in den Rauchgasen ist; diesen bindet die Lösung aber noch weniger fest; es kann also kommen, daß bei einer CO-Absorption das Äthylen ausgeschieden wird, das bei einer früheren Analyse absorbiert worden war: das Kohlenoxyd treibt gewissermaßen das Äthylen aus. Endlich kann, namentlich bei Temperaturänderungen der Lösung, Ammoniak- oder Salzsäuregas abgegeben werden und die Volumenvermehrung der Gase bewirken; bei genauer Zubereitung der Lösungen ist letzterer Fehler aber gering. Abhilfe gegen die Schwierigkeiten ist zu schaffen durch erschütterungsfreies Analysieren und Verwendung frischer Lösung, oder durch Anwendung eines weiteren Absorptionsgefäßes mit rauchender Schwefelsäure, die Äthylen und Ammoniak absorbiert; deren An-

[1]) Hempel, Gasanalytische Methoden, 1900, S. 185ff.

wendung wird noch auf S. 388 besprochen werden, da sie fast nur zur Kraftgasanalyse verwendet wird. Salzsäuregas und Ammoniak werden übrigens auch schon durch das Sperrwasser in einiger Zeit entfernt.

Ist es durch Unachtsamkeit passiert, daß ein Reagens ins Meßgefäß übergetreten ist, so wird man übersehen können, daß dadurch die eben im Gange befindliche Analyse nicht gefälscht wird, man kann sie ruhig beenden. Vor der nächsten aber muß man den Apparat reinigen und das Wasser in Meßgefäß und Niveauflasche erneuern. Hierbei kommt es leicht vor, daß das neueingefüllte Wasser andere Temperatur hat als das im Wassermantel des Meßgefäßes befindliche. Das ist unzulässig. Durch Wärmeaustausch ändert sich dann die Temperatur des Wassermantels von einer Gasablesung zur anderen und damit die des Gases bei der Messung; 3° Temperaturunterschied macht aber mehr als 1% Volumenunterschied aus. Der Apparat muß ganz auf Umgebungstemperatur sein, wenn man damit arbeitet. Muß man neues Wasser einfüllen, so temperiere man es.

Es gilt natürlich für die Gasanalyse dasselbe, was wir schon anderwärts anführten; die Analyse kann nur die Bestandteile der Probe angeben, die in den Meßzylinder eingesaugt wurde, und man hat dafür zu sorgen, daß bei der *Probeentnahme* eine Durchschnittsprobe der zu untersuchenden Gase eingenommen wird. Allerdings sind Unterschiede der Zusammensetzung über den Querschnitt des Rauchzuges hin wenig zu befürchten; die Rauchgase sind wohl stets so innig gemischt, daß die Entnahme irgendwie durch ein einfaches Rohr erfolgen kann. Entnimmt man dicht am Rauchschieber, neben dem stets Luft eingesaugt wird, so sind dadurch Fehler möglich.

Ist die Bleileitung zum Orsat undicht, so saugt man natürlich teilweise Luft ein. Wenn man durch eines der Schaulöcher, die in den Zügen zu sein pflegen, die Probe entnimmt, so muß man ein eisernes Rohr bis in den Feuerzug hineinführen; endet das Rohr noch innerhalb des Mauerwerkes, so erhält man stets lufthaltiges Rauchgas, weil infolge des Unterdruckes in den Feuerzügen und der Porosität des Mauerwerkes Luft durch das Mauerwerk hindurchgesaugt wird, also das Mauerwerk lufthaltig ist; andererseits darf das Entnahmerohr nicht so weit in die Züge hineinragen, daß es glühend wird. Sonst wird leicht CO_2 durch den am Eisen sitzenden glühenden Ruß reduziert, und die Analyse stellt einen Gehalt von CO fest, der in den Rauchgasen gar nicht vorhanden war. Man verschmiert das Schauloch dann mit Ton oder Schamottemörtel, um volle Abdichtung zu erzielen. Denn durch Undichtheiten werden leicht Luftströme unkontrollierbar so eintreten können, daß man überwiegend Luft ansaugt. Wo doppeltes Mauerwerk mit Schlackenisolierung dazwischen ist, hat die Abdichtung im inneren Mauerwerkskörper stattzufinden. Man vergleiche das über die Einführung von Pyrometern auf S. 329 Gesagte.

Wenn man mit dem Orsat-Apparat eine Probe von 100 ccm den Zügen entnimmt, so erhält man die augenblickliche Zusammensetzung der Rauchgase zur Zeit der Entnahme. Will man die durchschnittliche Zusammensetzung während einer längeren Periode haben, so muß man

möglichst häufig Proben entnehmen und den Durchschnittswert der Analyse berechnen. Statt dessen kann man aber auch einen Aspirator während einer längeren — beliebig langen — Zeit sich mit den Rauchgasen füllen lassen. Der Aspiratorinhalt hat dann die durchschnittliche Zusammensetzung der Rauchgase, und man macht eine oder besser zwei Analysen seines Inhaltes. Letztere Methode ist viel bequemer und gibt wohl auch bessere Durchschnittswerte; aber man will gewöhnlich schon während des Versuches die Zusammensetzung der Gase kennen, um den Betrieb danach anordnen zu können; dann muß man also Einzelanalysen machen und auch noch den Aspirator füllen. — Einen Aspirator für solche Zwecke, aus zwei einfachen Glasflaschen zusammengebaut, lernten wir in Fig. 282 kennen. Man muß darauf achten, daß während der Periode des Ansaugens der Niveauunterschied in den Flaschen etwa konstant bleibt, muß also die Flaschen ab und zu verstellen. Sonst erhält man nicht Gasmengen in den Aspirator, die den Zeiten proportional sind, und der Durchschnittswert wird falsch.

Es ist nicht gleichgültig, an welcher Stelle der Züge man die Probe entnimmt: die Rauchgase nehmen durch das Mauerwerk der Züge hindurch fortwährend Luft auf. So ergaben an einem Flammrohrkessel gleichzeitig genommene Rauchgasproben

am Ende des Flammrohres: 16,9% CO_2, 2,0% O, also 81,1% N,
Luftüberschußkoeffizient $l = 1{,}1$;
am Fuchs: 11,9% CO_2, 8,8% O, also 80,2% N,
Luftüberschußkoeffizient $l = 1{,}7$.

Es ist also noch halb so viel Luft nachträglich hinzugekommen, wie durch den Rost zur Verbrennung zugeführt worden war; es handelte sich dabei nicht um einen schlecht unterhaltenen Kessel, sondern die Undichtheit des Mauerwerkes hat meist solche Beträge. Nach der Analyse am Fuchs könnte man meinen, es sei zweckmäßig, den Luftzutritt zum Rost noch zu vermindern, was aber offenbar zu Kohlenoxydbildung führen müßte: es wird nicht möglich sein, bei diesem Kessel unter 1,7fachen Luftüberschuß am Fuchs herunterzukommen. — Hierin liegt bereits die Antwort auf die Frage nach der richtigen *Stelle der Probenahme*. Soll die Analyse dazu dienen, die gute Bedienung des Feuers zu überwachen, so sind die Gase am Ende des Flammrohres oder — bei anderen als Flammrohrkesseln — möglichst dicht hinter dem Feuerraum zu entnehmen, wo eben die Flammenentwicklung aufgehört hat; die Analyse am Fuchs führt hier zu Irrtümern. Etwas anderes ist es, wenn man aus der Rauchgasanalyse auf die durch den Schornstein entweichende Wärmemenge schließen will (Essenverluste, S. 383); hierfür ist die Zusammensetzung am Fuchs maßgebend, wo die Wärmeabgabe der Rauchgase beendet ist. Es kommt also wohl die Entnahme von Proben an beiden Stellen in Frage — beispielsweise um den Zustand der Kesseleinmauerung zu prüfen, für den die Zunahme des Luftüberschusses in den Zügen ein Maßstab ist.

Der Orsat-Apparat arbeitet bei geschickter Handhabung sehr zufriedenstellend. Für besonders genaue Arbeiten mag man immerhin

die in der Chemie üblichen Einrichtungen verwenden, die aber meist weniger gut transportfähig sind. In Frage kommen namentlich die *Hempelschen Apparate*; Meßgefäß (Bürette) und Absorptionsgefäß (Pipetten) sind voneinander getrennt, jedes für sich auf einem Stativ. Der Vorteil ist, daß man die Fehler vermeidet, die beim Orsat aus der Vernachlässigung der allerdings kapillaren Verbindungsleitung entstehen: die Leitungen werden sehr kurz und können bei Bedarf überdies noch mit Wasser ausgefüllt werden. Es sei auf die im Literaturverzeichnis genannten Werke verwiesen.

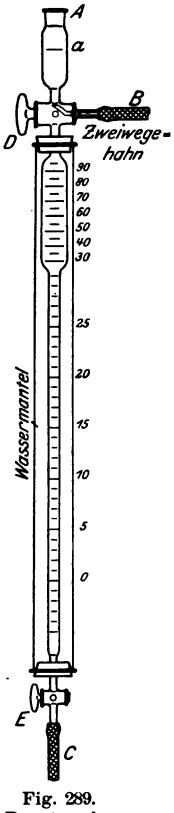


Fig. 289. Buntesche Bürette.

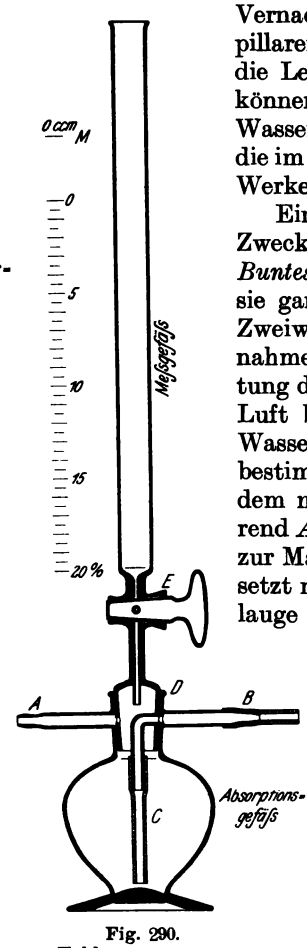


Fig. 290. Kohlensäuremesser von Cramer.

Ein Apparat, der für einfachere Zwecke gelegentlich ausreicht, ist die *Buntesche Bürette*, Fig. 289. Man füllt sie ganz mit Wasser, verbindet den Zweiwegehahn bei *B* mit der Gasentnahmestelle, nachdem man die Leitung durch ein T-Stück hindurch von Luft befreit hat, und öffnet *E*. Das Wasser läuft ab, Gas tritt nach. Einen bestimmten Druck stellt man her, indem man *D* nach *A* hin öffnet, während *A* voll Wasser ist, und das Wasser zur Marke *a* einstehen läßt. Man ersetzt nun das Wasser in *A* durch Kalilauge und öffnet erst *E*, dann *D*. Es tritt dann keine Luftblase nach oben hin aus, sondern nur Kalilauge ein, und die Absorption beginnt. Man schließt beide Hähne, legt die Bürette kurze Zeit wagerecht, ohne zu schütteln, um eine große Oberfläche zu haben, und spült dann die Kalilauge aus, indem man erst den Hahn *E* öffnet, während Schlauch *C* in Wasser taucht, behufs sicherer Herstellung einer Saugspannung, und dann *D* öffnet, nachdem *A* voll Wasser ist, so daß nun Wasser dauernd durch *D* ein-, durch *E* austritt. Nach genügend langem Auswaschen unter dauerndem Nachfüllen von Wasser in *A* schließt man *E* sorgsam so, daß das Wasser in *A* wieder zur Marke *a* steht, schließt *D* und liest ab. Man kann dann Pyrogallussäure einführen, auswaschen, ablesen und so fort.

Ein anderer Apparat für einfachere Zwecke ist der *Kohlensäuremesser von Cramer*, Fig. 290. In der gezeichneten Stellung der Hähne

kann man Rauchgas durch das Rohr *A* mittels eines bei *B* angeschlossenen Gummigebläses ansaugen. Der ganze obere Teil wird dann um 90° gedreht, so daß in dem Apparat ein bestimmtes Gasvolumen im Raum *C* abgesperrt ist. In das obere Meßgefäß hatte man nun Kalilauge bis zur Marke *M* gefüllt. Beim Öffnen des Hahnes *E* sinkt Kalilauge herab, und zwar bei passender Konzentration gerade bis zur Marke *E* der Skala, sofern nämlich Absorption von Gas gar nicht stattfindet, also z. B. reine Luft im Apparat wäre. Sobald aber Kohlensäure im Gefäß *C* ist, wird das absorbierte Volumen noch weiterhin durch herabsinkende Kalilauge ergänzt werden, und aus dem Meßgefäß wird um so mehr herabfließen, je mehr Kohlensäure das Gas enthielt. Demnach kann man empirisch eine Teilung anbringen, die unmittelbar Kohlensäureprozente anzeigt.

Die beiden letztgenannten Apparate sind weniger voluminös als der Orsat-Apparat. Der Vorteil des Orsat-Apparates aber besteht darin, daß er für den Transport sehr zweckmäßig vollständig in einen Kasten gebaut ist, auch ist er in der Handhabung bequem. Trotz des größeren Volumens und Gewichtes behauptet derselbe daher seine Stellung.

118. Was mißt die Analyse? Kontrolle des Ergebnisses. Die Analyse gibt die Bestandteile in Raumprozenten. Das sind aber Raumprozente des *trocken gedachten Gases*, wenn das Gas, wie meist, bei der Analyse mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Wenn sich nämlich durch Absorption eines der Bestandteile das Gasvolumen verkleinert, so muß sich ein verhältnismäßiger Teil des in dem Gase vorhanden gewesenen Wasserdampfes niederschlagen; in jedem Kubikzentimeter kann ja, bei bestimmter Temperatur, nur eine ganz bestimmte Menge Wasserdampf vorhanden sein. Ein prozentual gleicher Teil des Wasserdampfes wird also gewissermaßen auch absorbiert. Daher analysiert man trokkenes Gas. — Ein Rauchgas also, welches bei der Analyse 12% CO_2, 7,5% O, kein CO und als Rest 80,5% N ergab, kann bei der hohen Temperatur der Rauchgase noch eine beliebige Menge Wasserdampf enthalten haben, sagen wir 6%. Dann haben wir die gesamten Rauchgase mit 106% bezeichnet. — Die Voraussetzung, daß bei der Analyse der Sättigungszustand vorhanden ist, wird im allgemeinen zutreffen, weil die meisten Brennstoffe so viel Wasser und Wasserstoff enthalten, um das Rauchgasvolumen im abgekühlten Zustande zu sättigen; auch wird ja das die Sperrflüssigkeit bildende Wasser für Sättigung sorgen, wenn man ihm etwas Zeit zum Verdunsten läßt. Wo freilich die Sättigung nicht vorhanden ist — was bei wasserstoffarmem Brennstoff und bei großem Luftüberschuß vielleicht vorkommen kann — da würde man so lange Prozente des feuchten Gases ablesen, bis durch die Volumenverminderung Sättigung eingetreten ist, und erst weiterhin Prozente des trockenen Gases. Man wird das möglichst vermeiden, auch weil allmähliches Verdunsten des Sperrwassers Fehler bringen würde. Der Unterschied im Volumen des feuchten und des trockenen Gases im Sättigungszustand ist etwa 3% bei 20° C.

In dem Verschwinden des Wassers für die Analyse liegt die Erklärung dafür, daß der Stickstoffgehalt der Rauchgase meist größer als

79% ist; die Rauchgase enthalten mehr Stickstoff als die Luft, aus denen sie durch Hinzutritt der Bestandteile der Kohle entstanden sind. Das ist natürlich scheinbar. Die meisten Brennstoffe enthalten Wasserstoff, namentlich in Form von Kohlenwasserstoffen; bei der Verbrennung entsteht aus Wasserstoff Wasser unter Bindung eines Teiles des Sauerstoffes der Verbrennungsluft. Da nach den Atomgewichten auf 1 kg verbrannten Wasserstoffes 8 kg Sauerstoff kommen, so sind die verbrauchten Sauerstoffmengen selbst bei nur geringem Wasserstoffgehalt des Brennstoffes nicht unerheblich. Das gebildete Wasser aber fällt bei der Analyse heraus; daher ist das Volumen der Rauchgase kleiner als das der zugeführten Luft; der unverändert durchgegangene Stickstoff hat sich also prozentual vermehrt.

Voraussetzung für die Richtigkeit dieser Erklärung ist allerdings noch, daß sonst keine Volumenänderungen bei der Verbrennung eintreten; das ist nun bei vollkommener Verbrennung in der Tat nicht der Fall. Wir wollen das im Zusammenhang mit einigen anderen, aus den allgemeinen chemischen Gesetzen folgenden Beziehungen erörtern, deren Kenntnis oft zur Kontrolle der Analyse nützlich ist. Diese Beziehungen bedingen nämlich, daß die prozentualen Anteile von CO_2, O und N in den Rauchgasen voneinander abhängig sind.

Aus der Formel $C + 2\,O = CO_2$ folgt unter Benutzung der Atomgewichte $C = 12$ und $O = 16$, sowie der spezifischen Gewichte des Sauerstoffes $\gamma = 1{,}43$ kg/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ und der Kohlensäure $\gamma = 1{,}98$ kg/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$, daß folgende Gleichung für die vollkommene Verbrennung von Kohlenstoff richtig ist:

$$1\text{ kg C} + \frac{2 \cdot 16}{12 \cdot 1{,}43}\text{ cbm O} = \frac{12 + 2 \cdot 16}{12 \cdot 1{,}98}\text{ cbm } CO_2\,,$$

$$1\text{ kg C} + 1{,}86\text{ cbm}\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)\text{O} = 1{,}86\text{ cbm}\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)CO_2\,. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Für ganz unvollkommene Verbrennung ergibt sich entsprechend:

$$1\text{ kg C} + 0{,}93\text{ cbm}\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)\text{O} = 1{,}86\text{ cbm}\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)\text{CO} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Wir sehen also, daß bei der Bildung von CO_2 oder von CO das gleiche Volumen Gas entsteht, obwohl bei unvollkommener Verbrennung nur halb soviel Sauerstoff verbraucht ist. Außerdem ergibt sich, daß bei der vollkommenen Verbrennung das gleiche Volumen CO_2 entsteht, wie Sauerstoff verbraucht worden ist; das Volumen der Kohle als eines festen Körpers ist verhältnismäßig sehr klein; es findet also keine Volumenänderung statt; bei der Bildung von CO indessen nimmt das entstehende Verbrennungsprodukt doppelt soviel Raum ein, wie der verschwundene Sauerstoff ausmachte. Das sind Konsequenzen der Regel von Avogadro.

Wenn daher ein wasserstofffreier Brennstoff ohne Luftüberschuß vollkommen verbrennt, so ergeben sich Rauchgase von der Zusammensetzung: 21% CO_2 und 79% N; der Sauerstoff der Luft ist

einfach durch Kohlensäure ersetzt. Verbrennt ein wasserstofffreier Brennstoff mit Luftüberschuß, so ist ein Teil des Sauerstoffes durch Kohlensäure ersetzt; der Kohlensäuregehalt wird also unter 21% sein, aber Sauerstoff und Kohlensäure werden zusammen 21% ausmachen, während der Rest 79% Stickstoff ist. Der größtmöglichste CO_2-Gehalt der Rauchgase $k_{max} = 21\%$ tritt ein für $l = 1$.

Wenn dagegen ein wasserstoffhaltiger Brennstoff verbrennt, so wird $k_{max} < 21$ sein, weil, wie schon besprochen, der Wasserstoffgehalt einen Teil des Sauerstoffes zum Verschwinden bringt. Enthält etwa ein Brennstoff dem Gewicht nach 3% H und 75% C, so wird sich wegen der Atomgewichte der Sauerstoff im Verhältnis $3 \cdot \frac{1}{2}\frac{6}{} $ zu $75 \cdot \frac{3}{1}\frac{2}{2}$ oder im Verhältnis 24 : 200 auf die beiden Bestandteile verteilen; von den 21% Sauerstoff werden also $21 \cdot \frac{2}{2}\frac{4}{0}\frac{}{0} \sim 2^1/_2\%$ für die Analyse verschwunden sein; bei vollkommener Verbrennung ohne Luftüberschuß ergibt sich ein Wert $k_{max} = 18{,}5$. — Koks ist annähernd wasserstofffrei und liefert daher Kohlensäuregehalte bis zu 21%. Für Steinkohle kann man die genannten Zahlen als Durchschnittswerte einführen und $k_{max} = 18{,}5$ setzen; für Leuchtgas mit seinem größeren Wasserstoffgehalt ist k_{max} um 11 herum — beides natürlich abhängig von der Zusammensetzung.

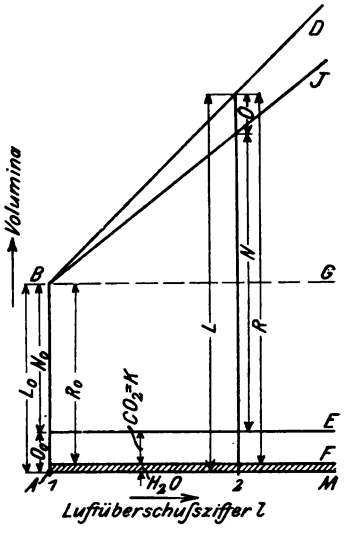


Fig. 291.
Zusammensetzung der Rauchgase bei verschiedenem Luftüberschuß.

Über die *Raumverhältnisse bei einer Verbrennung mit Luftüberschuß*, die jedoch vollkommen sein möge, gibt Fig. 291 Aufschluß. Als Abszisse ist die Luftüberschußziffer l aufgetragen. Für $l = 1$ wird ein Teil der zugeführten Luftmenge, die mit L_o bezeichnet ist und durch die Strecke AB dargestellt wird, zur Bildung von H_2O verbraucht und ist für die Analyse verschwunden; der Rest bildet die Rauchgasmenge R_o, bestehend aus CO_2 und N. Für $l > 1$ tritt zu der Rauchgasmenge R_o der Luftüberschuß hinzu. Für beliebige Werte von l wird der Luftüberschuß $L - L_o = L_o \cdot (l - 1)$ durch die ansteigende Gerade BD begrenzt werden. Dabei behalten, wenn wir die Betrachtung stets auf 1 kg Brennstoff beziehen, die gebildete Kohlensäure und das verschwundene Wasser absolut genommen ihren Wert bei; zwei wagerechte Gerade E und F begrenzen daher diese Bestandteile. Der Luftüberschuß oberhalb der Wagerechten G besteht jederzeit aus 79 Teilen N, die zu dem bei überschußloser Verbrennung vorhandenen N hinzutreten, und aus 21 Teilen O, die oben abgeteilt sind. Die Rauchgasmenge R ist etwas kleiner als die zugeführte Luftmenge L.

Wenn wir nun mit K, N und O den Bestandteil an Kohlensäure, Stickstoff und Sauerstoff in Kubikmetern, wenn wir aber mit k, n und o

den prozentualen Anteil derselben in den Rauchgasen bezeichnen, so ist zunächst für $l = 1$: $k_{max} = \frac{100\,K}{K + N_o} = \frac{100\,K}{R_o}$. Allgemein aber ist

$$\begin{cases} k = \dfrac{100 \cdot K}{R} = \dfrac{100\,K}{R_o + L_o \cdot (l-1)}, \\ o = \dfrac{100 \cdot O}{R} = \dfrac{100 \cdot \frac{21}{79} N_o \cdot (l-1)}{R_o + L_o \cdot (l-1)}. \end{cases}$$

Beide Gleichungen lassen sich schreiben wie folgt:

$$\begin{cases} (l-1) \cdot \dfrac{L_o}{R_o} = \dfrac{100\,K}{R_o \cdot k} - 1 = \dfrac{k_{max}}{k} - 1, \\ (l-1) \cdot \dfrac{L_o}{R_o} = \dfrac{o}{21 - o}, \end{cases}$$

oder endlich

$$\begin{cases} l = \left(\dfrac{k_{max}}{k} - 1\right) \cdot \dfrac{R_o}{L_o} + 1 \quad \ldots\ldots\ldots (5) \\ l = \dfrac{o}{21 - o} \cdot \dfrac{R_o}{L_o} + 1 \quad \ldots\ldots\ldots (6) \end{cases}$$

Aus beiden folgt durch Division und Auflösen

$$21 \cdot k + k_{max} \cdot o = 21 \cdot k_{max} \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

Diese Gleichungen geben die Abhängigkeit der Größen k und o von der Luftüberschußziffer l und voneinander. Die Beziehung zwischen k und o läßt sich (Fig. 292) durch eine Gerade darstellen, die die o-Achse bei 21% und die k-Achse bei k_{max} schneidet, deren Neigung also vom Brennstoff abhängt und auf dessen Gehalt an nicht ausgeglichenem Wasserstoff schließen läßt. Hat man k und o bestimmt, so hat man also aus dem Einspringen verschiedener Analysen in eine Gerade ein gutes Kennzeichen entweder für die Genauigkeit der Analysen oder für die Vollkommenheit der Verbrennung. Glaubt man dagegen in diesen beiden Punkten einer Kontrolle nicht zu bedürfen, so braucht man, nachdem man die Lage der Geraden für den betreffenden Brennstoff kennt, nur entweder die Kohlensäure oder den Sauerstoff zu bestimmen. — In Fig. 293 ist gezeigt, wie für Steinkohle, $k_{max} = 18{,}5\%$, der Kohlensäure- und Sauerstoffgehalt vom Luftüberschuß abhängt; die Kurven sind nach Gleichung (5) und (6) Hyperbelbögen, mit Asymptoten, wie sie angedeutet sind; durch Zusammenzählen der Ordinatenwerte erhält man einen Überblick über die scheinbare Vermehrung des Stickstoffgehaltes $o + k = 100 - n$.

Für wasserstofffreie Brennstoffe ist $\frac{R_o}{L_o} = 1$. Damit würde aus (5) und (6) werden

$$l = \frac{k_{max}}{k} = \frac{21}{21 - o} \quad \ldots\ldots\ldots (8)$$

Diese gelegentlich verwendeten Ausdrücke für die Luftüberschußzahl sind also nur für wasserstofffreien Brennstoff zutreffend, etwa

für Koks. Für Steinkohle bilden sie gute Näherungswerte, wenn es sich um etwas größeren Luftüberschuß handelt; für Leuchtgas wären sie unbrauchbar.

Beim Auftreten von CO sind die Ableitungen entsprechend abzuändern. Die in Fig. 292 dargestellte Beziehung zwischen dem CO_2- und O-Gehalt wird dergestalt abgeändert, daß die für den betreffenden Brennstoff gültige Gerade um so weiter nach unten rückt, je mehr CO in den Rauchgasen enthalten war. Man könnte also aus der Kenntnis des CO_2- und O-Gehaltes schon auf den CO-Gehalt schließen, auch ohne die langwierige Absorption mit Kupferchlorür durchzuführen.

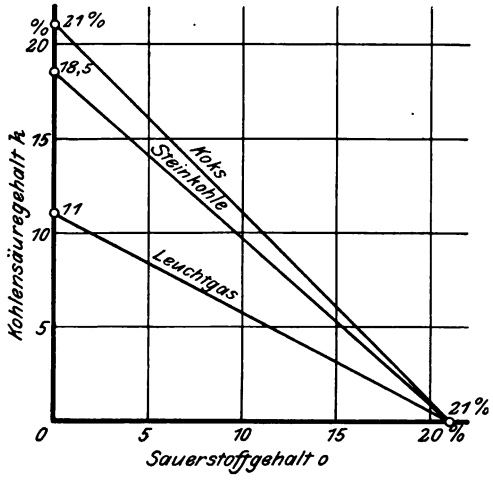


Fig. 292. Zusammenhang zwischen Kohlensäure- und Sauerstoffgehalt der Rauchgase; Verbrennung vollkommen (nach Borth).

Wenn man übrigens den linearen Verlauf der Beziehung zwischen k und o, Fig. 292, zur Kontrolle der Analyse benutzen will, so darf man nicht aus dem Auge lassen, daß das Einspringen der einzelnen Analysenpunkte in eine genaue Gerade nur dann zu erwarten ist, wenn der Brennstoff eine dauernd gleichmäßige Zusammensetzung hat. Wenn aber bei periodischer Beschickung einer Steinkohlenfeuerung kurz nach dem Beschicken das wasserstoffreiche Schwelgas, später aber überwiegend der zurückbleibende Koks verbrennt, so werden die Punkte je nach der Zeit der Probenahme etwas von der Geraden differieren dürfen; nicht so bei kontinuierlicher Beschickung des Rostes und Entnahme an stets derselben Stelle der Feuerung.

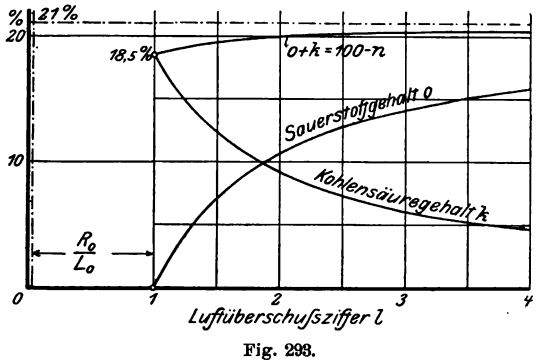


Fig. 293.
Zusammensetzung der Rauchgase bei verschiedenem Luftüberschuß; Verbrennung vollkommen; Steinkohle.

119. Essenverluste. Aus der Rauchgasanalyse kann man auf die *Rauchgasmenge* schließen, die den Fuchs passiert. Mißt man auch die Temperatur der Rauchgase, so kann man weiterhin die Wärmeverluste

berechnen, die die Feuerung dadurch erleidet, daß man die Rauchgase warm abgehen läßt, also nicht ganz ausnutzt. Da man diese Rechnung sehr oft im Anschluß an die Rauchgasanalyse durchführt, so sei sie wiedergegeben.

Man muß den Kohlenstoffgehalt der verbrannten Kohle kennen. Man kann ihn zugleich mit dem Heizwert bestimmen, wie auf S. 359 besprochen wurde. Man kann ihn aber auch bei Steinkohle mit ziemlicher Zuverlässigkeit auf 80 bis 70%, für gute bis schlechte Kohle, schätzen. Es sei im folgenden an die Kohle gedacht, deren C-Gehalt auf S. 359 zu 73,1% bestimmt worden war.

Dann kann man von der Tatsache Gebrauch machen, die wir auf S. 376 besprachen, daß aus 1 kg Kohlenstoff das gleiche Gasvolumen von 1,86 cbm $\binom{0}{760}$ entsteht, gleichgültig ob er zu Kohlensäure CO_2 oder zu Kohlenoxyd CO verbrennt — also auch wenn teils das eine, teils das andere Verbrennungsprodukt entsteht. Daher entstehen aus 1 kg unserer Kohle $0{,}731 \cdot 1{,}86 = 1{,}36$ cbm $\binom{0}{760}$ $[CO_2 + CO]$. Diese 1,36 cbm stellen nun prozentual denjenigen Bruchteil der gesamten Rauchgasmenge dar, den die Analyse festgestellt hat. Also folgt die Gesamtmenge aus einem einfachen Regeldetriansatz. Im Grunde genommen handelt es sich bei dieser Bestimmung der Rauchgasmenge um eine Anwendung der Mischungsregel, die wir in § 49 eingehend besprochen haben: der Kohlenstoffgehalt ist der indifferente Teil, mit dessen Hilfe man die Messung durchführt.

Habe eine Analyse etwa ergeben 6,8% CO_2, 12,8% O, kein CO, also 80,4% N, so folgt das aus 1 kg Kohle entstandene Rauchgasvolumen V_1 aus $V_1 : 1{,}36 = 100 : 6{,}8 = \dfrac{100 \cdot 1{,}36}{6{,}8} = 20{,}0$ cbm $\binom{0}{760}$. — Habe eine andere Analyse ergeben 11,9% CO_2, 5,8% O, 1,0% CO, also 81,3% N, so wird $V_1 = \dfrac{100 \cdot 1{,}36}{11{,}9 + 1{,}0} = 10{,}5$ cbm $\binom{0}{760}$.

Dies sind indes nur die Volumina des wasserfrei gedachten Rauchgases. Die Analyse gibt ja die Bestandteile des getrockneten Gases an (S. 375). Diese Tatsache zu berücksichtigen ist nicht üblich; dann aber erhält man das Rauchgasvolumen und mit ihm die Essenverluste um etwa 10%, bei Braunkohle noch mehr, zu klein. Für die Beurteilung der Verbrennungsvorgänge ist das nicht sehr von Belang, die Essenverluste indessen erhält man zu niedrig. Genau ist der Wasserdampfgehalt auch schwer zu bestimmen, leicht aber annähernd auf folgende Weise.

Aus der Bestimmung des unteren Heizwertes der Kohle in der Bombe weiß man, wieviel Wasser, hygroskopisch und durch Verbrennung entstanden, aus jedem Kilogramm verbrannter Kohle erzeugt wird; es ist meist etwa das halbe Kohlengewicht, da z. B. aus 5% H-Gehalt des Brennstoffs $5 \cdot 9 = 45\%$ Wasser bei der Verbrennung entstehen. Wir hatten (S. 356) mit der Bombe ermittelt, daß 0,528 kg Wasser aus 1 kg Kohle entstehen, so können wir unser Beispiel von oben fortführen. Dampf ist, bei gleichem Druck und gleicher Temperatur, etwa 0,62 mal so schwer wie Luft;

er wöge also, wenn wir ihn, ohne daß er kondensiert, auf die normalen Verhältnisse bringen könnten, $0{,}62 \cdot 1{,}293 = 0{,}80$ kg/cbm. Darin, daß wir diese Zahl für einen fingierten Normalzustand annehmen und weiter den Dampf behandeln, als folgten seine Druck- und Volumenänderungen dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz — darin liegt es, daß unsere Rechnung nur angenähert ist. Wir hätten danach $\frac{0{,}528}{0{,}80} = 0{,}66$ cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$ Wasserdampf aus jedem Kilogramm unserer Kohle erzeugt. Die oben aus den beiden Analysen errechneten Rauchgasvolumina sind also noch auf $V_1 = 20{,}7$ cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$ und auf $V_1 = 11{,}2$ cbm $\left(\frac{0}{760}\right)$ zu erhöhen. Die Nichtbeachtung des Dampfgehaltes hätte Fehler von 3,4% und von 6,2% im Gefolge gehabt.

Da übrigens für dieselben beiden Analysen der Luftüberschußkoeffizient auf S. 367 zu $l = 2{,}48$ beziehungsweise $l = 1{,}32$ berechnet war, so ergibt sich annähernd die für den betreffenden Brennstoff zur vollkommenen Verbrennung *notwendige Luftmenge* $L_0 = \frac{L}{l}$ einmal zu $\frac{20{,}7}{2{,}48} = 8{,}35$, das zweitemal zu $\frac{11{,}2}{13{,}2} = 8{,}49 \frac{\text{cbm}\left(\frac{0}{760}\right)}{\text{kg Kohle}}$; der Unterschied beider Zahlen hat seine Ursache darin, daß wir für L die Rauchgasmenge eingesetzt haben, die von der Luftmenge um die bei der Bildung des Wasserdampfes und des Kohlenoxydes eintretenden Volumenänderungen verschieden ist; außerdem mögen auch Ungenauigkeiten der Analyse mitsprechen.

Die ganze Berechnung bezog sich auf 1 kg verbrannter Kohle. Man hat das hierauf bezogene Rauchgasvolumen R mit der stündlich verbrannten Kohlenmenge K zu vervielfachen, um das stündlich durch den Fuchs gehende Volumen zu erhalten.

Wollten wir endlich nicht das auf 0° und 760 mm BStd reduzierte Rauchgasvolumen haben, sondern wollten wir, etwa um die Rauchgasgeschwindigkeit im Fuchs zu finden, das wirkliche Rauchgasvolumen kennen, so hätten wir Druck und Temperatur im Fuchs zu messen und eine entsprechende Umrechnung zu machen. Hierbei würden wir einfachheitshalber den Wasserdampf wie ein Gas behandeln. —

Die Essenverluste V selbst, die wir zunächst wieder auf 1 kg Brennstoff beziehen, sind nun gleich dem Produkt aus der Rauchgasmenge R, der spezifischen Wärme c_p der Rauchgase und ihrer Temperatur t_r über jene der Umgebung t hinaus.

$$V = R \cdot c_p \cdot (t_r - t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Die spezifische Wärme der Rauchgase bleibt zu bestimmen, und zwar kommt die mittlere spezifische Wärme, bezogen auf konstanten Druck, zwischen den Grenzen t und t_r in Frage. Die wahre spezifische Wärme und daher auch die mittlere nimmt mit der Temperatur, bei den zweiatomigen Gasen — O_2, N_2, CO — jedoch so wenig zu, daß es sicher genügt, bei den mäßigen Temperaturen, um die es sich bei Rauchgasen handelt, mit einem Mittelwert zu rechnen. Die spezifische Wärme der zwei-

atomigen Gase ist überdies ziemlich die gleiche, wenn man sie auf 1 cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ bezieht. Da sie zwischen 0° und 100° : $(c_p)_0^{100} = 0{,}297$ und zwischen 0° und 300° : $(c_p)_0^{300} = 0{,}302$ anzunehmen ist, so wird 0,30 WE/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ ein passender Mittelwert sein. Für mehratomige Gase pflegen die Werte an sich höher zu liegen als bei zweiatomigen. Es soll nach neueren Bestimmungen[1]) sein

$$\text{für } CO_2: (c_p)_0^t = 0{,}396 + 0{,}000146\ t - 0{,}000000035\,t^2, \quad . \quad . \quad (10)$$

$$\text{für } H_2O: (c_p)_0^t = 0{,}378 - 0{,}0000136\,t + 0{,}000000036\,t^2 \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Danach wäre für Wasserdampf bei geringem Druck die Abhängigkeit von der Temperatur eine sehr geringe und 0,38 WE/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ ein brauchbarer Mittelwert. Für CO_2 ist allerdings von 0 bis 100°; 200°; 300° die mittlere spezifische Wärme $(c_p)_0^t = 0{,}410$; 0,424; 0,437 WE/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$, also merklich mit der Temperatur steigend. Da indessen bei Rauchgasen der CO_2-Gehalt immer nur klein ist, so ist auch hier die Benutzung eines konstanten Wertes von etwa 0,42 WE/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ gerechtfertigt — zumal die Frage nach den richtigen Werten der spezifischen Wärmen noch nicht abgeschlossen ist.

Wenn wir also die folgenden Werte annehmen:
O_2, N_2, CO: $c_p = 0{,}30$; CO_2: $c_p = 0{,}42$; H_2O: $c_p = 0{,}38$ WE/cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$, so wird ein Rauchgas, das 11,9% CO_2 enthält und noch aus 88,1% O, CO und N besteht, eine spezifische Wärme haben, folgend aus $11{,}9 \cdot 0{,}42 + 88{,}1 \cdot 0{,}30 = 100 \cdot c_p$. Es wäre also $c_p = 0{,}314$.

Hiernach lassen sich die *Essenverluste* berechnen, die stattfänden, wenn das Gas keinen Wasserdampf enthielte. Wir haben aber gesehen, daß der Wasserdampf einen recht wesentlichen Bestandteil des Rauchgases ausmacht, selbst bei Steinkohle. Man wird also guttun, den Wärmeverlust durch Wasserdampf nicht zu vernachlässigen. Allerdings ist die latente Wärme des Wasserdampfes schon insofern berücksichtigt, als ja ihretwegen nur der untere Heizwert für den Brennstoff angesetzt ist. Nur der Mehrinhalt an Wärme über etwa 600 WE pro Kilogramm Dampf hinaus, nur der Verlust aus spezifischer Wärme des Dampfes bleibt noch zu berücksichtigen.

Hätte daher, wie im vorigen Paragraphen besprochen, das Rauchgas außer den 11,9% CO_2 und 88,1% O, CO und N, zusammen 100%, noch 6,2% Wasserdampf enthalten, so folgt seine spezifische Wärme aus $11{,}9 \cdot 0{,}42 + 88{,}1 \cdot 0{,}30 + 6{,}2 \cdot 0{,}38 = (100 + 6{,}2) \cdot c_p$, also wäre diesmal $c_p = 0{,}318$.

Nun wollen wir auch noch die Essenverluste selbst unter Annahme einer Fuchstemperatur von 300° ermitteln, und zwar, des Vergleiches wegen, ohne und mit Berücksichtigung des Wasserdampfgehaltes. Im ersten Fall hatten wir nach S. 380 10,5 cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$, im anderen 11,2 cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$ aus dem Kilogramm Kohle erhalten. Als

[1]) Holborn und Henning, Die Zahlen sind umgerechnet auf 1 cbm $\left(\begin{smallmatrix}0\\760\end{smallmatrix}\right)$.

Temperatur der Umgebung soll 20° eingeführt werden, so daß also 280° Temperaturüberschuß in Rechnung zu setzen ist. Dann werden die Essenverluste

ohne Beachtung des Wasserdampfgehaltes: $10{,}5 \cdot 0{,}314 \cdot 280 = 925$ WE,
mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes: $11{,}2 \cdot 0{,}318 \cdot 280 = 1000$ WE.

Bei der anderen Analyse der S. 380 mit 6,8% CO_2 hätten wir die Essenverluste erhalten

ohne Beachtung des Wasserdampfgehaltes: $20{,}0 \cdot 0{,}308 \cdot 280 = 1720$ WE,
mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes: $20{,}7 \cdot 0{,}310 \cdot 280 = 1800$ WE.

Der Unterschied von rund 80 WE zwischen beiden Rechnungsarten macht also immerhin 1,2% des Heizwertes aus, den wir auf S. 356 für diese Kohle zu 6900 WE/kg ermittelt hatten.

Mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes gibt die erste Analyse einen Verlust von 14,5%, die zweite einen solchen von 26,1% des Heizwertes als mit den Rauchgasen in den Schornstein gehend. Man sieht also, wie stark die Essenverluste ansteigen bei größerem Luftüberschuß; allerdings pflegt mit dessen Vergrößerung die Temperatur etwas abzufallen.

Man wird bemerkt haben, daß es seine Vorteile hat, den Rechnungen das reduzierte Volumen der Gase zugrunde zu legen, weil nämlich die spezifischen Wärmen einer Anzahl von Gasen bezogen auf Volumen die gleichen sind, nicht aber bezogen auf Gewicht. Auch die Tatsache war bequem, daß aus einer gegebenen Menge Kohlenstoff immer das gleiche Volumen Verbrennungsprodukt sich ergibt, möge nun CO_2 oder CO entstehen. Überhaupt gehorchen die chemischen Reaktionen der Gase glatten Raumverhältnissen — eine Folge der Regel von Avogadro.

Wollte man einwenden, die Wärmeverluste seien in unserer Rechnung auf zu viele Stellen angegeben (S. 27), so ist das an sich wohl richtig. Die einzelnen Angaben werden, wegen der Ungenauigkeit der spezifischen Wärmen, nur mäßige Genauigkeit haben; wo es sich aber um Vergleichsrechnungen handelt, wird man die Ergebnisse, um den Vergleich zu ermöglichen, genauer angeben dürfen, und der Vergleich wird genauer zutreffen, als die Einzelwerte es taten.

120. Selbsttätige Apparate. Um eine laufende Kontrolle des Feuerungsbetriebes zu ermöglichen, hat man Apparate erdacht, die die Angabe des Kohlensäuregehaltes der Rauchgase selbsttätig bewirken. Wünschenswert ist es, daß solche Apparate den augenblicklichen Gehalt der Rauchgase an CO_2 und damit den Luftüberschuß erkennen lassen, damit der Heizer sich in seinen Maßnahmen danach richten und gute Verhältnisse herbeiführen kann; außerdem ist es erwünscht, daß der Gehalt der Rauchgase an CO_2 registriert wird, damit der Betriebsleiter die Wirtschaftlichkeit des Betriebes überwachen kann, und damit auch wohl Prämien an die Heizer gezahlt werden können.

Die Apparate, die diese Aufgabe lösen, arbeiten entweder so, daß sie den CO_2-Gehalt der Rauchgase in Kalilauge absorbieren lassen und den Verlust an Volumen feststellen; oder aber sie nutzen die Tatsache

aus, daß CO_2 rund 1,5 mal so schwer ist als die anderen, untereinander etwa gleich schweren Bestandteile der Rauchgase; diese Apparate messen dann das spezifische Gewicht der Rauchgase.

Von den Absorptionsapparaten möge der *Ados-Apparat* genannt werden; eine neuere Form stellt Fig. 294 dar; die einzelnen Teile sind maßstäblich richtig, jedoch der Übersichtlichkeit wegen in anderer Anordnung wiedergegeben, als sie mit Rücksicht auf Raumersparnis im Apparat haben. Der Leitung entnommenes Wasser gibt die Kraft her, um einerseits die Rauchgase aus den unter Saugspannung stehenden Zügen anzusaugen, andererseits sie mit dem Absorptionsmittel in Berührung und zur Messung zu bringen. In den Überlaufkasten fließt dauernd Wasser zu; ein Teil davon fällt durch eine Lochreihe in das Saugrohr und reißt die darin enthaltene Luft mit. Dadurch entsteht eine Saugwirkung, die das Gas aus den Zügen durch das oben rechts endende Rohr über *A*, durch das Meßgefäß hindurch und über *B* ansaugt. Zu Zeiten, wo der Weg durchs Meßgefäß durch Flüssigkeit gesperrt ist, perlt das Gas durch das Sperrgefäß hindurch von *A* nach *B*. — Ein anderer Teil des in den Überlaufkasten kommenden Wassers geht durch einen Hahn abwärts in den Kraftwerkbehälter. Es bleibt durch einen Schwimmer von dem destillierten Wasser getrennt, das diesen Behälter halb füllt. Der Kraftwerkbehälter ist geschlossen; daher entsteht beim Eintreten von Wasser Druck, der ein Anstauen des Leitungswassers im Trichterrohr und im Heberohr und ein Übertreten des destillierten Wassers in das Meßgefäß zur Folge hat. Es wird schließlich dahin kommen, daß der Heber bis zur oberen Biegung *a* voll ist, daß Wasser in seinen linken Arm tritt und daß damit seine Wirksamkeit als Heber einsetzt; er entleert das Leitungswasser aus dem Kraftwerkbehälter, weil die Heberwirkung stärker ist als der Wasserzulauf; dadurch fällt auch das destillierte Wasser aus dem Meßgefäß in den Kraftwerkbehälter zurück. Es findet also periodisch ein Ansteigen und Fallen der Flüssigkeit im Meßgefäß statt.

Hierbei geschieht nun folgendes: Kommt beim Ansteigen der Wasserspiegel im Meßgefäß in die Höhenlage *b*, so hört der Gasdurchgang hier auf und geht nun durchs Sperrgefäß. Bei weiterem Steigen wird Gas in den Gummibeutel verdrängt, bis der Wasserspiegel die Höhenlage *c* erreicht. Von diesem Augenblick an kann nur noch das, was gerade in dem zum Gummibeutel führenden Rohr ist, in ihn treten, der Inhalt des eigentlichen Meßgefäßes aber wird durch einen kapillaren Gummischlauch ins Absorptionsgefäß gedrückt. Nun sind aber vom Trennungspunkt *c* bis zu einer auf das Kapillarrohr geätzten Marke *d* gerade 100 ccm Raum im Meßgefäß, die zur Zeit der Abtrennung Atmosphärenspannung haben, wenn nicht etwa die Gummiblase schon gespannt war, was aber nicht sein soll. Die Wasserfüllung des Kraftwerkbehälters ist so abgepaßt, daß der Heber gerade dann mit der Entleerung beginnt, wenn das Wasser im Meßgefäß die Marke *d* erreicht hat; daher werden also 100 ccm Gas ins Absorptionsgefäß gedrängt und verdrängen ihrerseits Kalilauge ins Glöckchengefäß, in dem nur der Spiegel steigt. Die Luft unter dem Glöckchen entweicht zunächst durch das

beiderseits offene Röhrchen ins Freie; erst wenn die Kalilauge die Höhenlage *f* erreicht hat, wird der Luft der Ausweg versperrt, und das Glöckchen, dessen Inneres durch einen Glyzerinverschluß abgeschlossen ist, hebt sich und bewegt einen Schreibstift, der auf der Papiertrommel einen Strich zieht. Der Inhalt des Glöckchengefäßes von der Marke *e*, bis zu

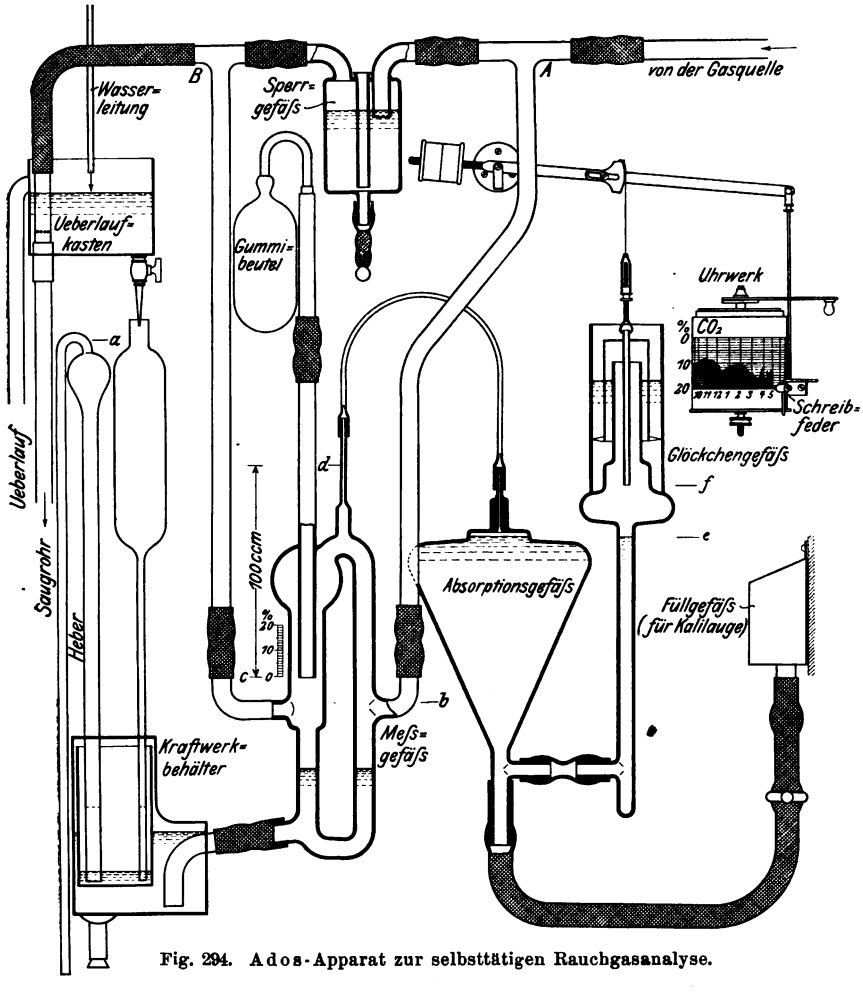


Fig. 294. Ados-Apparat zur selbsttätigen Rauchgasanalyse.

der die Kalilauge in der Ruhe steht, bis zur Höhenlage *f* ist nun so bemessen, daß die aus dem Meßgefäß ins Absorptionsgefäß kommenden ersten 80 ccm die Kalilauge gerade von *e* bis *f* treiben; von *e* bis *f* sind also etwas weniger als 80 ccm Raum vorhanden, wegen der Kompression der Gase im Absorptionsgefäß entsprechend dem Unterschied der Kalilaugenstände. Der zylindrische Teil des Glöckchengefäßes oberhalb *f* ist so bemessen, daß weitere 20 ccm, die aus dem Meßgefäß

kommen und nicht etwa von der Kalilauge absorbiert werden, die Schreibfeder gerade die ganze Skala des Papierstreifens durch einen senkrechten Strich füllen lassen. Ist nun CO_2 in den Rauchgasen, so wird sie von der Kalilauge alsbald absorbiert, und der Schreibstift hebt sich nur noch um den Betrag, der an Rauchgasvolumen über 80 ccm hinaus nach dieser Absorption noch geblieben war: bei 17% CO_2 in den Rauchgasen wird der Strich nur noch 3 Teile lang statt 20. — Der Strich ist beendet in dem Augenblick, wo der Heber den Kraftwerkbehälter zu entleeren beginnt; die Schreibfeder sinkt, wenn das destillierte Wasser im Meßgefäß sinkt, und nach Freigabe des Weges durchs Meßgefäß werden die Rückstände durch neues Rauchgas fortgeblasen.

In älteren Formen des Ados-Apparates wird das Steigen und Fallen der Flüssigkeit durch mechanisches Heben und Senken einer Niveauflasche wie beim Orsat-Apparat bewirkt; das Ansaugen der Gase geschieht durch eine kleine Pumpe mit Wasserverschlüssen als Dichtung und an Stelle der Ventile. Die Kraft zur Bewegung beider kann einem durch den Schornsteinzug betätigten Kraftwerk übertragen werden, aber auch durch Elektromotor oder sonstwie erfolgen. Vor diesen älteren Formen hat die beschriebene den Vorzug, viel weniger Raum einzunehmen und billiger in der Anschaffung zu sein; dafür verursacht freilich das Wasser Betriebskosten. Trotz ihres zunächst umständlich scheinenden Baues arbeiten diese Apparate in jahrelangem Betriebe ausgezeichnet und auch sehr befriedigend genau. Wegen der Handhabung im einzelnen sei auf die Prospekte verwiesen. Ähnliche Apparate werden auch von der Feuertechnischen Gesellschaft, Berlin, unter dem Namen Ökonograph, von der Firma Eckardt in Cannstatt und von anderen in den Handel gebracht.

Die Feststellung des spezifischen Gewichtes der Rauchgase gestattet, wie erwähnt, auch einen Schluß auf den Gehalt an Kohlensäure. Man kann also jeden der in § 47 beschriebenen Apparate auch zur Feuerungskontrolle verwenden. So hat man die Gaswage und ähnliche Einrichtungen zu verwenden gesucht, doch wie es scheint ohne dauernden Erfolg; die feinen Apparate versagen im Staub des Kesselhauses leicht ihren Dienst, und es ist zu bedenken, daß die Kohlensäure höchstens $^1/_5$ der Rauchgase ausmacht, während ihr Relativgewicht gegen Luft 1,52 ist; also handelt es sich um Messungen des Relativgewichtes zwischen den engen Grenzen von 1,0 und 1,1. Bewährt hat sich indessen der Apparat, den wir in Fig. 85, S. 110, darstellten, wo der Unterschied des Gewichtes zweier Gassäulen durch ein Mikromanometer gemessen wird. Diese Gassäulenwage ist als *Krellscher Rauchgasanalysator* so ausgebildet, daß die Stellung der Äthersäule des Mikromanometers photographisch registriert werden kann; auch wird eine Art Fernablesung so ausgeführt, daß der Heizer den jeweiligen Stand der Äthersäule von der Vorderseite des Kessels aus erkennt, während doch der Apparat hinten am Fuchs zu stehen pflegt.

Wenn man Wert darauf legt, daß der Heizer sich vom augenblicklichen Stand des Feuers jederzeit überzeugen kann, so ist jeder Apparat, der so das spezifische Gewicht feststellt, offenbar im Vorteil gegenüber den Absorptionsapparaten, die zu der Analyse eine Zeit von immerhin

einigen Minuten gebrauchen. Diese *Nacheilung* ist, soweit sie in der Dauer der Analyse begründet ist, ein dem Ados-Apparat anhaftender Nachteil. Oft entsteht freilich eine viel größere Nacheilung bei Apparaten aller Art dadurch, daß der Rauminhalt der von der Entnahmestelle zum Apparat führenden Leitung zu groß ist. Die Gasprobe kommt immer erst zum Apparat nach der Zeit, wo dieser Inhalt einmal ausgewechselt ist. Man sorge also für kurze und nicht allzu weite Zuleitung und für energische Saugwirkung, die auch das in die Zuleitung meist eingebaute Holzwollfilter zum Abhalten von Ruß gut überwindet. — Als *Entnahmestelle* wird nach dem auf S. 373 Gesagten für die selbsttätigen Analysatoren nur das Flammrohrende oder das Ende der Feuerung, nie aber der Fuchs zu empfehlen sein.

121. Analyse anderer Gase; Bestimmung von Kohlenwasserstoffen und H. *Kraftgase* enthalten im allgemeinen Kohlenoxyd CO und Wasserstoff H als Hauptbestandteile, ferner Methan CH_4 und schwere Kohlenwasserstoffe in kleineren Mengen, endlich CO_2, O und N als nutzlosen Ballast. Es handelt sich darum, diese Bestandteile zu bestimmen.

Für CO_2, O und CO kann man die schon auf S. 370 besprochenen Absorptionsmittel verwenden, für CO jedoch, wenn H vorhanden ist, nur die ammoniakalische Kupferchlorürlösung. Zur Absorption von schweren Kohlenwasserstoffen, die zu vereinzeln schwierig ist, dient rauchende Schwefelsäure; es ist also, bei Anwendung eines dem Orsat-Apparat nachgebildeten Apparates, ein viertes Absorptionsgefäß nötig. Die Reihenfolge der Absorptionen ist CO_2, schwere Kohlenwasserstoffe, O, CO. Der Gasrest enthält, wenn nicht noch besondere Bestandteile in Frage kommen, H und CH_4, die durch Verbrennung bestimmt werden; den Rest sieht man als N an.

Die Bestimmung des Gehaltes an H und CH_4 erfolgt aus der bei der Verbrennung eintretenden Volumenverminderung Δ und nach Bedarf auch durch Messen der bei der Verbrennung neuerdings entstandenen CO_2 (die ursprünglich vorhandene war vorher absorbiert). Die Verbrennung geschieht nach bestimmten wieder aus der Avogadroschen Regel folgenden Volumenverhältnissen, wobei man das Volumen des entstehenden Wassers immer Null setzen kann, da es sich niederschlagen wird, weil der Raum schon vorher mit Wasserdampf gesättigt war (S. 375). — Es gilt:

$$\left.\begin{aligned} &2\,\text{Rt. H} + 1\,\text{Rt. O} = 0\,\text{Rt. } H_2O;\ \text{also war } H = \tfrac{2}{3}\Delta\ ; \\ &2\,\text{Rt. } CH_4 + 4\,\text{Rt. O} = 2\,\text{Rt. } CO_2 + 0\,\text{Rt. } H_2O\ ; \\ &\qquad \text{also war } CH_4 = \tfrac{1}{2}\Delta\,, \quad \text{oder auch } CH_4 = CO_2\,. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Sind beide Gase zugleich vorhanden, so kann man, wenn man sie zugleich und nicht etwa nacheinander verbrennt, aus der Volumenverminderung noch keine Schlüsse ziehen; wohl aber kann man dann erst durch Absorption der gebildeten CO_2 den Methangehalt CH_4 feststellen; von der gesamten Kontraktion Δ ist dann $2\,CH_4 = 2\,CO_2$ auf Rechnung des Methans zu setzen, und der Wasserstoffgehalt muß $H = \frac{2}{3}\,(\Delta - 2\,CO_2)$ sein.

Die Verbrennung der beiden Gase kann gemeinsam oder getrennt erfolgen. Bei Berührung mit Palladiumschwamm oder Palladiumdraht, die durch elektrischen Strom oder mittels Flamme auf 400 bis 500° C erhitzt sind, verbrennt H (und eventuell CO), jedoch nicht CH_4. Bei Berührung mit hellrot glühendem Platin (Palladium ist hierfür wenig dauerhaft) verbrennt CH_4 und natürlich auch H, wenn es nicht vorher entfernt war. Man kann das Platin in Gestalt einer in ein Glasgefäß ähnlich den Absorptionsgefäßen eingeschmolzenen Drahtspirale verwenden, die elektrisch zum Glühen gebracht wird. Der Draht ist für gewöhnlich unter Wasser; das Wasser wird durch die Rauchgase in ein kommunizierendes Gefäß verdrängt, so wie die Absorptionsflüssigkeiten es werden. Man kann aber auch ein kapillares Platinrohr verwenden, das die Verbindung zu einem mit Wasser gefüllten Gefäß von der Gestalt der Absorptionsgefäße bildet und das mittels Bunsenbrenners erhitzt wird; diese Drehschmidtsche Platinkapillare hat den Vorteil, daß bei ihrer Verwendung immer nur das vorwärtsströmende Gas erhitzt wird, so daß selbst bei brisanteren Mischungen eine Explosion unwahrscheinlich ist; die Enden der Kapillare werden zu dem Zweck auch noch mit Wasser gekühlt.

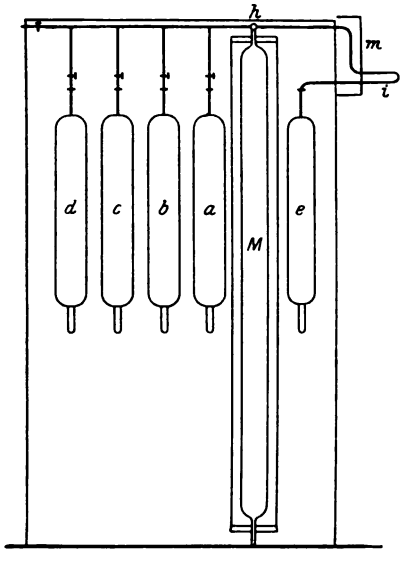


Fig. 295. Schema des erweiterten Orsat-Apparates nach Hahn.

Fig. 295 stellt schematisch einen für die Untersuchung von Kraftgasen eingerichteten *erweiterten Orsat-Apparat* dar. *M* ist der Meßzylinder; er ist, im Gegensatz zu Fig. 285, überall gleichweit, da hier nicht wie bei Rauchgasen die Absorption von höchstens $\frac{2}{100}$ in Frage kommt. Die Gefäße *a*, *b*, *c* und *d* sind Absorptionsgefäße, gefüllt mit Kalilauge, rauchender Schwefelsäure, Pyrogallussäure und ammoniakalischer Kupferchlorürlösung. *h* ist ein Dreiwegehahn. *i* ist die Kapillare, die durch einen Wasserkasten *m* geht, insbesondere möglichst lange auf der Seite nach *h* zu, von wo das brisante Gemisch kommt; denn beim Übertritt in das Wassergefäß *e* ist ja schon der meiste Brennstoff verbrannt.

Die Handhabung des Apparates wäre folgende: Man saugt von links her an und stellt 100 ccm von Atmosphärenspannung her, wie beim Orsat. Man läßt erst CO_2 absorbieren, dann schwere Kohlenwasserstoffe; vor Messung der letzteren ist es gut, noch einmal ins Kalilaugegefäß zu gehen, um etwa mitgenommenen Rauch der rauchenden Schwefelsäure zu beseitigen. Dann wird O und CO absorbiert. Vor Messung des letzteren aber zweckmäßig, zur Beseitigung von Ammoniakdämpfen (S. 371), noch einmal ins Schwefelsäuregefäß und darauf, um

den Rauch zu beseitigen, wieder ins Kalilaugegefäß gegangen. Vom Gasrest wird der größte Teil ins Pyrogallusgefäß gedrückt; nur ein abgemessener Bruchteil bleibt im Meßzylinder und wird mit dem reichlich doppelten Quantum O, also mit etwa der 10fachen Luftmenge gemischt, die man von außen ansaugt; Gase mit großem Stickstoffgehalt kann man auch mit Sauerstoff mischen, ohne eine Explosion befürchten zu müssen. Die abgemessene Mischung wird nun durch die an der Spitze erhitzte Kapillare nach *e* gedrückt, zurückgesaugt und nochmal hingedrückt, worauf die Verbrennung vollkommen zu sein pflegt. Die eingetretene Kontraktion wird gemessen und dann durch Überführen in das Kalilaugegefäß auch die gebildete CO_2 bestimmt. Zur Kontrolle kann man die Verbrennung unter Verwendung dessen, was man ins Pyrogallusgefäß gedrückt hatte, wiederholen.

Die Rechnung möge am *Beispiel einer Leuchtgasanalyse* gezeigt werden[1]).

Anfangs angesaugt 100 ccm.			
Stand nach der CO_2-Absorption	bis	1,5;	also 1,5% CO_2
Stand nach Absorption der schweren Kohlenwasserstoffe	bis	5,3	3,8% SKW
Stand nach Absorption von O	bis	5,9	0,6% O
Stand nach Absorption von CO	bis	13,3	7,4% CO
Gasrest 86,7 ccm; hiervon verwendet 12,2 ccm, also Gas	bis	87,8	
Stand nach Luftzuführung	bis	0,8	
also Inhalt: 12,2 ccm Gas + 87,0 ccm Luft			
Stand nach der Verbrennung von CH_4 u. H	bis	20,4	
also Kontraktion 19,6			
Stand nach der Absorption von CO_2 . . .	bis	24,4	
absorbiert 4,0 ccm, also 4,0 ccm CH_4 von 12,2 ccm			
Methangehalt $4{,}0 \cdot \frac{86{,}7}{12{,}2} =$			28,4% CH_4
Wasserstoffgehalt $\left[\frac{2}{3} \cdot (19{,}6 - 2 \cdot 4{,}0)\right] \cdot \frac{86{,}7}{12{,}2} =$			55,0% H
Rest Stickstoff			3,3% N
			100,0%

Statt des erweiterten Orsat-Apparates kann man auch die Hempelschen Apparate verwenden, die mit Verbrennungsröhren verschiedenster Art zu benutzen sind. Mit wachsender Zahl der Gefäße nimmt natürlich die Handlichkeit des Orsat-Apparates im Vergleich mit den Hempelschen ab.

Es ist selbstverständlich, daß der Ingenieur erst Lehrgeld zahlen muß, wenn er sich auf die hier nur kurz angedeuteten umständlicheren Analysen einläßt. Bereitet doch schon die Handhabung des einfachen Orsat-Apparates dem Anfänger manche Schwierigkeit.

Über die Berücksichtigung des Wasserdampfgehaltes gilt hier Ähnliches wie für die Rauchgasanalyse (S. 375).

[1]) Nach Hahn, Z. d. V. d. Ing. 1906, S. 214.

122. Optische Analyse. Entnahme heißer Gase. Bei dem *Interferometer* der Zeißwerke wird die Zusammensetzung von Gasgemischen aus ihren optischen Eigenschaften ermittelt; Lichtstrahlen, von einer Glühlampe kommend, durchmessen eine 10 oder 20 cm lange Kammer, die das zu untersuchende Gas enthält, werden an einem Spiegel reflektiert und durchmessen die Kammer abermals. Der hin- und der rückkehrende Strahl kommen miteinander zur Interferenz, so daß ein Spektrum mit bunten und schwarzen Linien im Gesichtsfeld entsteht. Dieses Spektrum und namentlich eine schwarze Linie wechselt ihre Lage im Gesichtsfeld mit dem Brechungsexponenten des Gases in der Kammer. Da die ganze Einrichtung doppelt vorhanden ist und eine Kammer mit Luft als Vergleichsgas gefüllt bleibt, so erblickt man zwei Spektren, und die schwarzen Linien in beiden verschieben sich gegeneinander, wenn in die eine Kammer das Versuchsgas tritt. Durch eine optische Kompensation bringt man beide Linien wieder in Richtung zueinander: dazu dreht man mit Mikrometertrieb eine Planglasscheibe, die schräg von dem Strahl der Versuchskammer durchmessen wird, ein wenig, was auf eine Veränderung ihrer Dicke (in Richtung des Strahls) herauskommt und die Interferenz des hin- und rückgehenden Strahles miteinander verändert. Aus der erforderlichen Drehung schließt man unmittelbar auf den Unterschied der Brechungszahl des Versuchsgases gegen die der Luft. Aus diesem Unterschied kann man auf die Zusammensetzung des Gases schließen, wenn nur eine Komponente der Menge noch unbekannt ist, auf die das Instrument dann zu eichen ist. So kann man, vollkommene Verbrennung voraussetzend, auf den CO_2-Gehalt schließen, weil jedem CO_2-Gehalt nach Fig. 292 eine ganz bestimmte Zusammensetzung des gesamten Gases zugeordnet ist. Man kann aber nichts aus der Brechungszahl folgern, wenn bei unvollkommener Verbrennung z. B. CO_2 und O und CO mehrdeutig miteinander variieren können; man müßte dann zwei Beobachtungen machen und dazwischen einen Bestandteil durch Absorption beseitigen.

Man arbeitet, wenn die Eichung einmal vorgenommen ist, mit dem Interferometer sehr schnell. Die Genauigkeit ist an sich sehr groß, hängt aber natürlich davon ab, ob die Teile der Gasmischung genügend verschiedene Brechungszahlen haben. Einige Brechungszahlen für weißes Licht gegen Luftleere sind folgende:

CO_2: 1,00045	O: 1,00028	H_2C: 1,00026
CO : 1,00034	N: 1,00030	CH_4: 1,00044

Man kann also Sauerstoff und Stickstoff kaum optisch unterscheiden, auch CO nur schwer von Luft trennen. Dagegen sind CO_2 und CH_4 gut nachweisbar. Die Einstellung macht dem in optischen Beobachtungen nicht Geübten anfangs einige Schwierigkeit.

Da auch Druck- und Temperaturänderungen die Brechungszahl beeinflussen, so kann man das Interferometer auch als sehr empfindlichen Druckmesser verwenden. —

Über die Entnahme von Rauchgasen oder überhaupt von Gasgemischen aus heißen Räumen, z. B. aus dem Feuerraum oder aus dem Innern der Kohlenschicht, sei noch nachgetragen, daß dazu am besten

das *kaltwarme Rohr* dient. Bei ihm wird die Entnahmeöffnung durch Wasser gekühlt, das in einem Doppelrohr aus Messing hin- und wieder zurückgeführt wird. Es handelt sich darum, die Temperatur der entnommenen Gase möglichst schnell herabzusetzen. Mit der Temperaturabnahme der Gase ist nämlich in jedem Falle eine Störung des Gleichgewichtszustandes der Gaskomponenten gegeneinander verbunden, die eine Reaktion der Komponenten untereinander — manchmal auch mit dem Metall des Entnahmerohrs — erstrebt. Durch schnelles Abkühlen wird zugleich die Reaktionsgeschwindigkeit so stark herabgesetzt, daß die erstrebte Änderung der Gaszusammensetzung praktisch nicht merklich zustande kommt. Um das Gas wirksam zu kühlen, ist ein kleiner Durchmesser des Entnahmeröhrchens erforderlich. Man kann dafür nahtloses Kupferrohr verwenden, das schon mit 1 mm innerem bei 2 mm äußerem Durchmesser im Handel ist. Man wird aber bald auf etwas größeren Durchmesser übergehen, um die Ansaugewiderstände nicht zu groß werden zu lassen.

Literaturverzeichnis.

Allgemeines.

Carpenter und Diederichs, Experimental Engineering and manual for testing. 7. Aufl. 1132 S. New York 1912. Bringt das ganze im vorstehenden behandelte Gebiet, ferner Materialprüfungen und die Ausführung von Maschinenuntersuchungen zur Darstellung.

Recht ähnlich, jedoch unter Ausschluß der Materialprüfungen, sind die folgenden drei Werke englischer Sprache gehalten, während gleich umfassende deutsche Werke bisher nicht genannt werden können:

Moyer, Power Plant Testing. 486 S. New York u. London 1913.

Royds, The testing of motive power engines. 396 S. London 1911.

Pullen, Experimental Engineering. London 1906.

Brand, Technische Untersuchungsmethoden, insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes. 3. Aufl. 352 S. Berlin 1913.

Kohlrausch, Praktische Physik, 12. Aufl. 1914. Klassisches Werk über physikalische Messungen; vieles daraus wird auch für technische Zwecke brauchbar sein. Eine kleinere Ausgabe führt den Namen „Leitfaden der praktischen Physik", 2. Aufl. 1907.

Zahlreiche einzelne Instrumente findet man namentlich nach der theoretischen Seite hin besprochen in: Grashof, Theoretische Maschinenlehre, und Weisbach, Ingenieurmechanik.

Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum, behandelt auch einiges über Maschinenmessungen.

Landolt und Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, 4. Aufl. 1912, ein umfangreiches Sammelwerk von Zahlenwerten, tut gute Dienste bei der Auswertung, wo das bekannte „Taschenbuch der Hütte" seinen Dienst versagt.

Größere Versuchseinrichtungen, bei denen naturgemäß eine große Reihe von Einzelmessungen und Instrumenten beschrieben sind, findet man besprochen in den verschiedenen Heften der Forschungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, herausgegeben vom Verein deutscher Ingenieure seit 1902; ferner unter anderen in:

Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozeß der Gasmaschine, Verhlg. d. Vereins z. Beförd. d. Gewerbfl. 1891ff., auch als Buch erschienen.

E. Meyers Untersuchungen über Explosionsmotoren, Z. d. V. d. Ing. 1895 bis 1905.

Frese, Ingenieurlaboratorium Hannover, Z. d. V. d. Ing. 1900.

Berndt, Gasmaschinenlaboratorium Darmstadt, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 1869.

Mechanisch-technische Laboratorien Dresden, Z. d. V. d. Ing. 1905, S. 839.

Martens und Guth, Die Materialprüfungsanstalten der Technischen Hochschule Berlin.

Haack, Schiffwiderstand und Schiffsbetrieb, Versuche am Dortmund-Ems-Kanal, Z. d. V. d. Ing. 1900.

Lindley, Versuche an einer Dampfturbine (Elberfeld), Z. d. V. d. Ing. 1900.

Leistungsversuche an Schnellzuglokomotiven, Engineering 4. 11. 1898.

Recknagel, Fernmeß- ... Vorrichtungen in Heizungs- und Lüftungsanlagen. Gesundh.-Ing. 8. 2. 1908.

Burstall, Versuche an Gasmotoren, Engineering 1898ff.

Heller, Messungen an Motorwagen, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1583.

Glazenbrook, The National Physical and Engineering Laboratory, Engineering 1903.

Beschreibungen von Dynamometerwagen (Prüfwagen für Eisenbahnen), Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 1444; Elektrotechn. Z. 1904, S. 65; Engineering News 15. 5. 1902; 6. 6. 1907; Trans. American Inst. Electr. Eng. Mai 1902 (Arnold), Am. Maschinist 15. 6. 1907.

Zu Kapitel IV. Längenmessung.

Hagen, Berücksichtigung der Temperatur bei Längenmessung, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 329.

Reuleaux, Amerikanische Feinmeßvorrichtungen. Verhandlg. Gewerbefl. 1894, Heft 3, S. 142.

Prégel, Feinmessungen im Maschinenwesen. Dingler 1894, Bd. 292, S. 1, 35, 79.

Schlesinger, Messen in der Werkstatt und Herstellung austauschbarer Teile, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 1379.

Galassini, Instruments de mesure de haute précision pour les ateliers mécaniques. Revue de méc. Juli 1903.

Feinmeßmaschine von Cooke & Sons, York, für van der Kerchove. Engineering 30. 11. 1894.

Spangberg, Universal-Normalmaße mit abgestufter Toleranz, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 2068.

Stadthagen, Sicherung richtigen Längenmaßes, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 2070.

Leman, Technische Messungen. Dtsch. Mechaniker-Ztg. 1910, S. 101; Werkstatttechnik 1910, S. 362. Bemerkungen zu Ausführungen der 2. Aufl. dieses Buches, jetzt in § 19 berücksichtigt. Hierzu je eine Entgegnung. Dabei auch Literatur über Längenmessungen.

Zu Kapitel V. Flächenmessung.

Theorie des Planimeters, von Kirsch. Z. d. V. d. Ing. 1890, S. 1053; von Land, Z. d. V. d. Ing. 1899, S. 1064.

Patch, Some observations on the use of polar planimeters. Engineering News 13. 4. 1899.

Lorber, Über Coradis Kugelrollplanimeter. Z. f. Vermessungswesen 1888, S. 161.

Prytz Stangenplanimeter. Engineering 1896, S. 205, 255, 347.

Hummel, Über Integraphen. Dingler 1890, Bd. 275, S. 17; Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1904, S. 213.

Abdank-Abakamowicz, Die Integraphen (Buch).

Zu Kapitel VI. Messung der Spannung.

Rosenkranz, Neuerungen an Federmanometern, Z. d. V. d. Ing. 1896, S. 495.

Stromeyer, Remarks on pressure gauges (and indikators), Engineering 30. 8. 1907, S. 316.

Manometer der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 261.

Jacobus, Messung von Drucken von 700 at und mehr, Engineering New 1897, S. 327.

Martens, Apparate zur Messung hoher Flüssigkeitsdrucke, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 747.

The estimation of high pressures, Engineering 9. 1. 1903.

Klein, Der Genauigkeitsgrad von Hochdruckmessern: Wagemanometer von Stückrath, Martensmanometer, Differentialkolbenwage von Schaeffer & Budenberg, u. a. m. Z. d. V. d. Ing. 1910, S. 792.

Martens, Über die Brauchbarkeit des Federmanometers für die Messung großer Kräfte im Materialprüfungswesen. Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 204, 303. Manometer mit gerader gedrehter Bourdonfeder; Prüfstand, Wagemanometer von Stückrath.

Mikromanometer mit 2 großen Gefäßen mit Wasserfüllung und Spitzenablesung auf 0,01 mm in Arlt, Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1590; Forschgsarb. H. 115.

Benutzung von Staurohren, Mikromanometer, Differentialmanometer bei Ventilatoruntersuchungen, in Brabbée, Z. d. V. d. Ing. 1910, S. 1261.

Differentialmanometer zur Messung von Wasserdruckunterschied, in Reichel, Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 1415. Zweischenkliges Quecksilbermanometer mit veränderlicher Neigung.

Spannungszeiger für absolute Drücke: The Engineer, 17. November 1911, Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 2032. Zwei Bourdonfedern, eines als Barometerrohr luftleer, das andere zum Aufnehmen der Kondensatorspannung, dazu ein Differenzialgetriebe.

Quecksilbermanometer mit Verdränger, in Frese, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 245.

Der Langen-Luxsche einschenklige Druckmesser, J. Gasbel., Wasservers. 1890, S. 217.

Zugmesser für Dampfkesselfeuerung, verschiedene Konstruktionen kritisiert. Dingler 1903, Bd. 318, S. 225.

Krell, Hydrostatische Meßinstrumente (Buch).

Zu Kapitel VII. Zeit- und Geschwindigkeitsmessung.

Gelcich, Die Uhrmacherkunst. 640 S. Wien 1892.

Bock, Die Uhr. 136 S. Leipzig 1908. (Aus Natur und Geisteswelt.)

Veeder-Zähler (sehr kompendiöses Zählwerk mit springenden Zahlen). Broschüre von Ludw. Loewe & Co., 1911.

Neuerungen an Vorrichtungen z. Anzeigen der Fahrgeschwindigkeit. Dingler 22. 2. 1895.

Lux, Frahms Frequenz- u. Geschwindigkeitsmesser, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 952.

Pflug, Geschwindigkeitsmesser f. Motorfahrzeuge u. Lokomotiven (Buch).

Bautze, Entwicklg. d. elektr. Fahrgeschwindigkeitsmessg., Elektrot. Z. 15. 10. 1908.

Versuche der Physik. Technischen Reichsanstalt mit Brauns Gyrometer, Z. d. V. d. Ing. 1896, S. 186; vgl. dies. 1894, S. 475.

Grays, Elektrisches Schiffslog., Z. d. V. d. Ing. 1901, S. 933.

Wagener, Über Geschwindigkeitsmesser und deren Prüfung, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 483.

Hoffmann, Untersuchungen an Geschwindigkeitsmessern. Forschungsarbeiten Heft 100.

Benischke, Elektrische Geschwindigkeitsmeßapparate, Elektrot. Z. 1903.

Riehm, Experimentelle Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades. Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 1101, daselbst mehr Literatur, Forschungsarbeiten Heft 137.

Die Ottschen Flügel d. eidgenössischen hydrom. Büros. Schweiz. Bztg., 6. 10. 1906.

Schmidt, Beschreibung der Prüfstation München. Gleichung der Woltmannschen Flügel, graphische Bestimmung der Flügelgleichung, Z. d. V. d. Ing. 1895, S. 917; 1903, S. 1698.

Katalog über hydrometrische Flügel und Flügelausrüstungen von A. Ott, Kempten, Bayern.

Williams, Experiments at Detroit on the flow of water in curved pipes. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 10. 11. 1901 (Pitotrohr).

Untersuchung der Strömungsvorgänge in einer Francis-Turbine: Bestimmung der Wassergeschwindigkeit und Richtung mittels Pitotrohr in Schuster, Forschungsarbeiten Heft 82 oder Z. d. V. d. Ing. 1910, S. 1733.

Eckart, Impulse water wheels and the Pitot tube. Engineering 1910, I, S. 91. Pitotrohr für sehr hohe Geschwindigkeit abgebildet. Auf S. 95 viel Literatur betr. Pitotrohre.

Ellon, Messung der Wassergeschwindigkeit mit der Pitotschen Röhre, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 989. Dazu Bemerkungen von Ott, S. 1207.

Bericht des (amerikanischen) Ausschusses zur Prüfung von Vorschlägen für Regelung bei der Messung von Luftgeschwindigkeiten an Austrittsöffnungen mit Hilfe des Anemometers. Gesundh.-Ing. 1914, S. 429. — Man beachte insbesondere die zutreffende Bemerkung des Übersetzers, wonach man beim Aufsetzen eines Flügelrades auf ein Gitter die mittlere Geschwindigkeit nicht mit der freien, sondern mit der gesamten Fläche des Gitters zu multiplizieren hat.

Bericht des (amerikanischen) Ausschusses zur Aufstellung von Regeln bei der Benutzung von Staurohren. Gesundh.-Ing. 1914, S. 466.

Katzmayr, Verhalten von Staugeräten bei Neigungen zur Strömungsrichtung. Motorwagen, 1914, S. 303.

Burnham, Experiments with Pitot tubes in measuring the velocity of gases in pipes. Engg. News 21. 12. 1905.

Vambera und Schraml, Direkte Messung der Geschwindigkeit heißer Gasströme. Stahl u. E. 6. 3. 1907.

Stach, Bestimmung der Geschwindigkeit und des Druckes von Gasen und Dämpfen. Glückauf 1910, S. 47.

Recknagel, Verteilung der Luftgeschwindigkeit über den Querschnitt des Rohres (Stauscheibe), Z. f. Kälteindustrie 1899, S. 172.

Recknagel, Pneumometer. Gesundh.-Ing. 1899, S. 255, Z. f. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen 1899, S. 22.

Krell, Über die Messung des statischen und dynamischen Druckes bewegter Luft. München 1902 (Buch).

Pitotrohr mit Mikromanometer von Fueß, erwähnt in Fürstenau, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1131.

Benutzung von Staurohren, Mikromanometer, Differentialmanometer bei Ventilatoruntersuchungen, in Brabbée, Z. d. V. d. Ing. 1910, S. 1261.

Morris, The electrical measurement of wind velocity, Engineering 1912, II, S. 892. Messung aus der Abkühlung, die ein stromdurchflossener Draht erfährt. Ähnlich in Retschy, Motorwagen 1912, oder in der Liste über Anemoklinometer von Siemens & Halske.

Zu Kapitel VIII. Messung der Stoffmenge.

Messung des spezifischen Gewichts: von Gasen in Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen (s. o.).

Krells Rauchgasanalysator, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 157.

Pfeiffer, Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Leuchtgas. Journ. Gasbel. Wasserversorg. 1903, S. 451.

Wägen: Brauer, Konstruktion der Wage, erschienen 1883, theoretisch. Der Atlas enthält gute Abbildungen älterer Formen.

Lawaczek, Beitrag z. Theorie u. Konstruktion d. Wage. Dingler, 20. 10. 1906.

Grubeck, Neuerungen im Bau der Wagen für Fahrzeuge, Z. d. V. d. Ing. 1896, S. 206.

Wagen von C. Schenck, Glasers Annalen 1. 7. 1900.

Selbsttätige Kohlenwage von Schenck, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 113.

Selbsttätige Kohlenwagen von Schenck und von Schmitt beschrieben in: Mitt. d. Kais. Normal-Eichungs-Kommission, 3. Reihe, Nr. 14 vom 23. 2. 1914.

Veritas-Apparat von Spies, Sicherung gegen falsches Drucken, ebenda, 4. Reihe, Nr. 2 vom 19. 8. 1912; Eichvorschriften dafür in 4. Reihe, Nr. 3 vom 19. 4. 1913.

Neuerungen an Wägehebel und Entlastungsvorrichtung, Organ für Fortschritte des Eisenbahnwesens 1895, Heft 2, S. 31.

Brix, Kontrolleinrichtungen und selbsttätige Wagen für Förderanlagen. Fördertechnik Dez. 1913.

Kranwagen bis 200 t Wiegefähigkeit, abgebildet Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1956

Wassermessung: Wassermeßgefäße im Ingenieurlaboratorium Stuttgart, Z. d. V. d. Ing. 1901, S. 1338.

Undeutsch, Absolutes und relatives Messen der Undichtheit von Gefäßwandungen. Österr. Zeitschr. f. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen 1890, S. 235.

Brauer, Neues Verfahren zur Wassermessung, Z. d. V. d. Ing. 1892, S. 1493.

Francis, Lowell hydraulic experiments (Buch, klassische Wehrmessungen).

Frese, Überfallmessungen, Z. d. V. d. Ing. 1890, S. 1285.

Hansen, Überfallmessungen, Z. d. V. d. Ing. 1892, S. 1057.

Wagenbach, Der dreieckige Überfall. Z. f. d. ges. Turbinenwesen 1910, S. 561. Vergleich der Genauigkeit mit rechteckigem Wehr.

Wagenbach, Experiments on the flow of water over triangular notches. Engineering 1910, I, S. 435.

Iterson, Methode chimique pour la Mesure du Débit des conduites d'eau. Le Génie Civil 1904, S. 411. Chemical Method of Watermeasuring, Engineering 29. Mai 1914, S. 743.

Über das genannte chemische Verfahren sei im Nachtrag zum Text folgendes erwähnt: Die auf S. 116 genannte Reaktion ist die folgende, die in der analytischen Chemie allgemein für die titrimetrische Bestimmung von Jod, hier aber umgekehrt verwendet wird. Dem zu messenden Wasser wird eine wäßrige Lösung von Natriumthiosulfat $Na_2S_2O_3$ (= Natriumhydrosulfit, Fixiersalz der Photographie) in bekannter Menge zugefügt. Zur Bestimmung der Konzentration in der zu messenden Wassermenge dient Jodlösung, das ist eine Lösung von Jod in wässeriger Jodkaliumlösung, da es in Wasser unlöslich ist. Das Jodkalium selbst bleibt indifferent, die Reaktion verläuft wie folgt:

$$2\,Na_2S_2O_3 + J_2 = 2\,NaJ + Na_2S_4O_6 \text{ (Natriumtetrathionat).}$$

Die Jodlösung wird durch Zusatz von etwas Stärkekleister intensiv blau gefärbt; bei Zufügung der Jodlösung zu der zu untersuchenden Natriumthiosulfatlösung verschwindet die Blaufärbung so lange, wie Thiosulfat für obengenannte Reaktion verfügbar ist. Sobald die Blaufärbung bleibt, ist überschüssiges Jod vorhanden.

Nach dem Molekulargewichte bindet 127 g Jod 248 g $Na_2S_2O_3 + 5\,H_2O$. Man verwendet am besten $^1/_{10}$-normale Jodlösung: 12,7 g Jod, trocken und rein, werden mit 20 g KJ zu 1 l Lösung in Wasser gelöst; jeder Liter, der zur Beibehaltung der Blaufärbung nötig ist, bedeutet 24,8 g Thiosulfat in der untersuchten Wasserprobe. — In der Apotheke käufliche Jodlösung muß eventuell durch Kaliumbichromat auf Zusammensetzung geprüft werden.

Dieses Verfahren wird in der Brauindustrie allgemein als genauestes Mittel zur Ausmessung von Gefäßinhalten benutzt (Mitteilung des Herrn Dr. E. Glimm).

Man kann auch statt des Salzes einen Farbstoff zusetzen. Die Konzentration nach erfolgter Beimengung zu der zu messenden Wassermenge wird bestimmt, indem man eine Probe der ursprünglichen Farblösung auf gleiche Farbintensität verdünnt, was mit dem Auge in kolorimetrischen Gefäßen (aus Apparatehandlungen zu beziehen) zu beurteilen ist. Als Farbstoff dient am besten Fluoreszein, das noch in Verdünnungen von 1 : 100 000 bis 1 : 1 000 000 quantitativ genau zu erkennen ist. In nicht farblosem Wasser wird Eosin besser zu erkennen sein, von dem man aber mehr braucht. Genauigkeit 1,5 % mit Eosinlösung 1 : 1000. Vgl. Zeitschr. f. d. ges. Wasserwirtschaft 1913, S. 259; Ges. Ing. 1913, S. 884.

Wegen der großen praktischen Wichtigkeit einer Meßmethode für große Wassermengen, die überdies gar keine Stauung und damit verbundene Änderung der Förderhöhe verlangt, werden vorstehende Notizen noch nachgetragen.

Zuppinger, Neuere Meßmethoden zur Bestimmung von Wassermengen. Schweiz. Bauztg. 1913, S. 49. (Beifügung von Chemikalien, Kochsalz.)

Schmidthenner, Neues Wassermeßverfahren (Schirmmessung), Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 627.

Reichel, Wassermessungen i. d. Versuchsanstalt f. Wassermotoren a. d. Kgl. Techn. Hochschule Berlin (Schirmmessung), Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 1835.

Wassermessungen bei der Firma J. M. Voith, in Oesterlen, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 1875.

Berndt, Gieseler, Benutzung von Pitotrohr oder Flügel zur Wassermessung, Z. d. V. d. Ing. 1885, S. 700, 982.

Disharge measurement on the Niagara River, verschiedene Geschwindigkeitsmesser, Engineering News 28. 12. 1899.

Schönheyder, Water meters, Zusammenstellung von Konstruktionen, Engineering 1900.

Wassermesser-Normalien, Journ. Gasbel. Wasservers., 22. 7. 1899.

Strubler, Erfahrungen mit Wassermessern beim Dampfkesselbetrieb, Schweiz. Bauztg. 1890, Bd. 16, S. 74.

Hot water meters in boiler practice. Iron Age 19. 11. 1903.

Lux, Wassermesserverbindungen, Z. d. V. d. Ing. 1896, S. 923.

Kolbenwassermesser von Eckardt abgebildet Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1744.

Woldt, Über Woltmann-Wassermesser, Journ. Gasbel., Wasservers. 23. 5. 1908, S. 448; 7. 11. 1908, S. 1058.

Michalek, Erprobung eines Wassermessers System Steinmüller. Z. Dampfk.-Vers.-Ges. 1914, S. 30.

Flüssigkeitsmesser (Kippmesser) 600 l/st, von Steinmüller, abgebildet bei Berndt, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 1875.

Dyes, Graphischer Wassermesser. Dingler 7. 3. 1908, S. 154.

Lux, Wassermesserprobierstation, Journ. Gasbel., Wasservers. 1894, S. 322.

Venturi-Meter, Journal o. t. Franklin Inst. 1899, S. 108.

Coleman, Flow of flouids in a Venturi-tube (Wasser-, Gas-, Dampfmessung), Proc. Am. Soc. Mech. Eng. Nov. 1906.

Hazen, Venturimeter coefficients. Engineering News 1913, S. 198. Beizahlen zur Berücksichtigung der Reibung.

Gasmessung: Lebrecht, Versuche mit raschlaufenden Kompressoren, worin sehr lehrreiche Vergleiche zwischen verschiedenen Luftmeßmethoden gezogen werden, Z. d. V. d. Ing. 1905, S. 151.

E. Meyer, Bestimmungen des Gasverbrauchs mittels Glocke, Z. d. V. d. Ing. 1899, S. 483.

A. O. Müller, Messg. v. Gasmengen m. d. Drosselscheibe, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 285; Forschgsarb. H. 49.

Brandis, Exakte Messung der durch eine Leitung strömenden Gas-(Luft-) menge mittels Drossel-Meßscheibe (Staurand). Dissertation Aachen 1913.

Stach, Messung großer Gasmengen mittels Differenzdruckes, Stahl u. E. 1. 5. 1907, S. 618.

Normaleichungs-Kommission, Bildliche Darstellung der eichfähigen Gasmesser, großes Figurenwerk mit Text.

Homann, Eichfähige Gasmesserkonstruktionen, J. Gasbel., Wasservers. 1893.

Poplawsky, Kubizierapparat für Gasmesser; Der Eichkolben zur Prüfung der Kubizierapparate (Bücher).

Messung großer Luftmengen mittels mehrerer Düsen und eigenartigem Mikromanometer in Arlt, Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1588; Forschgsarb. H. 115.

Meßdüsenanordnung für Messungen sehr großer Luftmengen (bis zu 36 000 cbm/st.) in Langer, Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 176.

Terbeck, Düsenmeßversuche an einem Kolbenkompressor. Glückauf 1911, S. 64.

Der Gasmesser v. Thomas (Beschreibung und Abbildungen), Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 1130; Iron age, 16. 3. 1911.

Thomas Gasmesser für 85 000 cbm/st. in Simon, J. Gasbel., Wasservers. 10. 2. 12.

Dampfmessung: Bendemann, Dampfmesser, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 13, 142; Forschgsarb. H. 37.

Peabody & Kuhnhardt, Flow of steam through orifices, Engineering Bd. 49, S. 64.

Dampfmesser („Dampfzeiger") in Neumann, Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 293.

Dampfmesser der Chemischen Fabrik Rhenania. Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 195.

Schultze, Betriebsmäßige Dampfverbrauchskontrolle an Turbinen. Z. ges. Turbinenw. 1912, S. 442. Laufende Beobachtung des Dampfzustandes vor den Düsen, Berechnung aus dem Düsenquerschnitt.

Schreibfeder für Dauerschreiber mit selbsttätigem Farbnachfluß, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 800.

Zu Kapitel IX. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

Martens, Die Meßdose als Kraftmesser, Z. d. V. d. Ing. 1906, S. 1311, und Forschgsarb. H. 38.

Dynamomètre à pression hydraulique, mißt Reaktion der Schiffswelle. Génie civil 18. 2. 1899.

Nachtweh, Hilfsmittel und Methoden bei der Prüfung landwirtschaftlicher Maschinen. Frühlings Landwirtschaftl. Ztg. 1904, 1905, 1906, S. 323.

Nachtweh, Älterer und neuerer Kurbelkraftmesser. Mitteil. d. Verbandes landwirtschaftl. Masch.-Prüf.-Anstalten 1909, S. 71.

Martiny, Zugkraftmessung an Bodenbearbeitungsgeräten. Ebd. 1911.

Martiny, Die Prüfung von Motorpflügen. Ebd. 1911.

Bernstein, Meßinstrumente zur Untersuchung von Motorpflügen. Motorwagen 1913, H. 9 u. 10.

Rezek, Zugdynamometer für Maschinenpflüge. Mitteil. d. k. k. Techn. Versuchsamtes Wien 1913, H. 1—2. Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 33.

Kalep, Methoden der experimentellen Bestimmung des Trägheitsmomentes von Maschinenteilen. Zivilingenieur 1892, S. 381.

Bremsen: Brauer, Bremsdynamometer u. verwandte Kraftmesser, Z. d. V. d. Ing. 1888, S. 56.

Brauer, 300 PS-Bremse auf Zahnrad laufend, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 1604.

Frese, Die selbsttätige Bremse D. R. P. Degn Nr. 94 718, hat sich bewährt, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 244.

Goß, Neue Formen von Reibungsbremsen. Industries and Iron, 6. 7. 1895.

Smallwood, Rope brakes, construction and design. Am. Mach. 1912, S. 310.

Bremseinrichtung für Turbinen in Reichel und Wagenbach, Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 445.

Quick, Brake tests of hydraulic turbines. Engg. News 8. 10. 1908, S. 384. (Alden-Bemse, siehe auch S. 125 der 1. Aufl. dieses Buches.)

Brotherhood, Absorption Dynamometer (Flüssigkeitsbr.), Engg. 31. 5. 1907, S. 723.

Wasserbremse für 2000 PS bei $n = 3000$, Bauzeichnung, in Rötscher, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 607.

Weighton, Froude-Bremse des Durham-College, Engineer 22. 1. 1897, auch 20. 6. 1902.

Froude-Bremse, Transactions o. t. Inst. of Mechan. Engineers 1877.

Rateau, Freins hydrauliques pour l'étude des turbines à vapeur. Mém. Soc. Ing. Civ. 1913, S. 513. Bremse für 800 PS bei $n = 4000$ und für 10 000 PS bei $n = 650$.

Feußner, Wirbelstrombremsen (kleine Modelle), Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 608.

Rieter, Elektrisches Präzisionsdynamometer, Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 195.

Verschiedene Bremsen (f. Automobilmotoren) bei Heller, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1583; (f. Wasserturbinen) bei Oesterlen, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 1876.

Wirbelstrombremse, beschrieben bei Nägel, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1407, und Forschungsarbeiten, Heft 54, S. 52. Neumann, Forschungsarbeiten (noch nicht erschienen).

Transmissions-Dynamometer: Kovarik, Über Absorptions- und Transmissionsdynamometer, zusammenstellende Beschreibung. Wochenschrift d. österr. Ingen.-Vereins 1891, S. 301.

Fischingers Arbeitsmesser, Zeitschr. f. Elektrotechnik 1891, S. 537.

Maihak, Registrierendes Transmissionswellendynamometer von Amsler-Laffon, Z. d. V. d. Ing. 1892, S. 1510.

Kohn, Riemendynamometer, Zeitschr. d. Österr. Ingen.- u. Archit.-Vereins 20. 12. 1895.

Hydraulisches Dynamometer von Amsler-Laffon, Z. d. V. d. Ing. 1905, S. 845.

Amsler, Neue Transmissions-Kraftmesser, Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1326. Abbildungen von optischen, Drucköl-, Pendelkraftmessern.

Vieweg, Torsionsdynamometer mit optischer Ablesevorrichtung, Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 1227.

Vieweg und Wetthauer, Bestimmung der Umdrehung umlaufender Wellen mittels Prismen oder Spiegel. Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 615.

Frahm, Untersuchungen über dynamische Vorgänge in Wellen, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 797.

Föttinger, Effektive Maschinenleistung und effektives Drehmoment, Forschgsarb. H. 25.

Neuere Torsionsmesser, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 679. Dazu Föttinger, S. 937.

Edgecombe, Torsion meters, Engineer 27. 11. 1908, S. 559; 11. 12. 1908, S. 614; 22. 1. 1909, S. 77; 19. 2. 1909, S. 186.

Hopkinson & Thring, A new torsion meter (ähnlich Föttinger, Spiegelablesg.), Engg. 14. 6. 1907, S. 768.

Nettmann, Der Torsionsindikator I. Die elektrischen Methoden zur Verdrehungsmessung. 78 S. Berlin 1912. II. Mechanische und optische Torsionsindikatoren, im Druck. III. in Vorbereitung.

Pendelaufhängungen zur Messung des Rückdruckes von Flugzeugmotoren, in Bendemann, Z. d. V. d. Ing. 1912, S. 1848.

Langer und Finzi, Messung der mechanischen Leistung durch elektrische Pendelmaschinen, Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 41. Dazu: Levy, Elektrische Pendelmaschinen, Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 597. Dazu ferner: Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 716.

Elektrische Leistungsmessung: Lindley, Schröter und Weber, Versuche an einer Dampfturbine mit Wechselstrommaschine, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 829.

Marek, Messung mit Präzisionsinstrumenten, Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 447.

Wasserwiderstände bei Oesterlen, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 1878.

Über elektrische Messungen im allgemeinen kann man sich in Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum, Stuttgart 1902, und in Krause, Messungen an elektrischen Maschinen, 2. Aufl., 193 S., Berlin 1907, Rat holen.

Zu Kapitel X. Der Indikator.

Rosenkranz, Der Indikator, ein vielbenutztes Werk; Pichler, Der Indikator; aus diesen beiden Werken und den Katalogen der Firmen kann man sich über die Einrichtung der Indikatoren und der Zubehörteile informieren.

Indikator von Wayne, mit auf Drehung beanspruchter Feder, wird für Präzisionszwecke sehr gelobt in Burstall, Engineering 1898; vgl. Chevillard, Revue industrielle 1895, S. 201.

Rosenkranz, Neuerungen an Indikatoren, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 1003.

Maihak, Fortschritte im Bau von Indikatoren (zahlreiche schematische Abbildungen von Kaltfederinstrumenten), Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1908.

Wilke, Hebel- und Kurbelhubminderer für den Antrieb der Papiertrommel des Indikators. Dingler 1914, S. 289, 328, 357.

Mader, Der Mikroindikator. Dingler 1912, S. 420, 433, 484.

Lichtstrahlindikator v. Hospitalier, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 365, 1904, S. 1311.

Hopkinsons optischer Indikator, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 2040, nach Engg. 25. 10. 1907.

Optischer Indikator von Nägel, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 246; Forschgsarb. H. 54, S. 4.

Optischer Indikator, beschrieben in Nusselt, Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 365.

Kirner, Optischer Interferenzindikator, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 1675; Forschgsarb. H. 88.

Burstall, Indicating gas engines (Vergleich von mechanischen und optischen Indikatoren), Engg. 6. 8. 1909, S. 193; Engr. 10. 9. 1909, S. 259.

Wagener, Neuerungen an Indikatoren, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1365.

Wagener, Indizieren und Auswerten von Zeit- und Kurbelwegdiagrammen (Buch).

Roser, Prüfung von Indikatorfedern, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 1575. Forschgs.-Arb. Heft 26.

Förster, Beitrag zur Bestimmung der Federmaßstäbe, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 319.

Eberle, Prüfung von Indikatorfedern, Zeitschr. des bayer. Dampfkessel-Revisions-Vereins, August 1901.

Wiebe und Schwirkus, Beiträge zur Prüfung von Indikatorfedern, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 55.

Wiebe, Temperaturkoeffizient bei Indikatorfedern, Forschgsarb. Heft 33.

Wiebe und Leman, Untersuchungen ü. d. Proportionalität des Schreibzeuges bei Indikatoren, Forschungsarb. Heft 34.

Staus, Einfluß der Wärme auf die Indikatorfeder, Forschgsarb. Heft 26/27.

Schwirkus, Über die Prüfung von Indikatorfedern. Auf Zug beanspruchte Indikatorfedern, Forschgsarb. Heft 26/27.

Fliegner, Dynamische Theorie des Indikators (mathematische Entwicklungen über Massenschwingungen), Schweiz. Bauztg. Bd. 18, S. 27.

Frese, Einfluß der Massenwirkung der Trommel, Z. d. V. d. Ing. 1900, S. 245.

Frese, Beeinflussung des Indikatordiagramms der Dampfmaschine durch die Art der Anbringung des Indikators; sehr lehrreicher Experimentalaufsatz, Z. d. V. d. Ing. 1885, S. 769.

Goß, Einfluß langer Rohrleitung, Z. d. V. d. Ing. 1896, S. 743.

Leitzmann, Versuche an Lokomotiven, zwangläufige Bewegung der Papiertrommel, Z. d. V. d. Ing. 1898.

Zu Kapitel XI. Messung der Temperatur.

Bücher: Manches über das Gebiet von Kapitel XI bis XIV findet sich besprochen in Fuchs, Wärmetechnik des Gasgenerator- und Dampfkesselbetriebes, 3. Aufl., Berlin 1913, sowie in G. A. Schultze, Theorie und Praxis der Feuerungs-Kontrolle, Berlin 1905 (letzteres unter besonderer Berücksichtigung der von der Firma G. A. Schultze gebauten Apparate).

Burgess and Le Chatelier, The measurement of high temperatures. 3. Aufl. 510 S. New York 1912. Deutsch von Leithaeuser, Die Messung hoher Temperaturen. 454 S. Berlin 1913.

Thieme, Temperaturmeßmethoden. 160 S. Berlin 1913.

Whipple, Modern methods of measuring temperature. Engg 1913, S. 165. Sehr eingehend.

Anwendung billiger Metalle für thermoelektrische Pyrometer, Z. d. V. d. Ing. 1913, S. 1039.

Holborn, Messungen am Le Chatelier-Element, Z. d. V. d. Ing. 1897, S. 226.

Messung hoher Temperaturen. Zusammenstellung der Methoden; Dingler, Bd. 286, S. 43; Proceedings Instit. Civil Engineers Bd. 110, S. 152.

Schütz, Neue Methoden für Messung hoher Temperaturen, Z. d. V. d. Ing. 1904, S. 155.

Thermoelement mit Wasserkühlung, bei Nägel, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 1411.

Temperaturmessungen mit Thermoelementen, in Eberle, Forschgsarb. Heft 78.

Temperaturmessung mittels Thermoelementen, umfangreiche Schaltvorrichtung: in Doblhoff, Forschgsarb. Heft 93.

Messung von Temperaturen mittels Thermoelementen, insbesondere der Oberflächentemperatur, in Wamsler, Forschgsarb. Heft 98/99.

Petersen, Verfahren zur Messung schnell wechselnder Temperaturen, Z. d. V. d. Ing. 1914, S. 602; Forschgsarb. Heft 143.

Pneumatisches Pyrometer von Uehling & Steinbart, für Hochöfen viel benutzt. Stahl u. Eisen 1. 5. 1899.

Féry, Optical pyrometry, Engg. 18. 10. 1901, S. 539; spiral pyrometer, Engg. 14. 5. 1909.

Optisches Pyrometer Wanner, Z. f. Dpfkess.- u. Dpfm.-Betr. 8. 2. 1905.

Whipple, Thermometers and pyrometers, industrial application, Engg. 17. 2. 1905, S. 226.

Wanner-Pyrometer, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 616; 1904, S. 161; 1908, S. 156, J. Gasbel., Wasservers. 2. 11. 1907.

Meyer, Messung hoher Temperaturen auf optischem Wege. Dingler 1913, S. 516.

Krukowsky, Temperaturmessungen im Feuerraum e. Lokomotive währ. d. Fahrt, Z. d. V. d. Ing. 1909, S. 345.

Koepsel, Fernthermometer für technische Zwecke. Dingler 1912, S. 721.

Zu Kapitel XII. Messung der Wärmemengen.

Staus, Abgaskalorimeter für einen Gasmotor, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 649.

Testing electric generators by air calorimetry, Engineering 4. 12. 1903.

Laßwitz, Wärmezähler, Gesundh.-Ing. 1914, S. 215. Besprechung der insbesondere für Warmwasserheizungen vorgeschlagenen Konstruktionen.

Möller, Bestimmung des Wassergehaltes im Kesseldampf (Zusammenstellung der Verfahren). Z. d. V. d. Ing. 1895, S. 1059; dasselbe von Lüders, Z. d. V. d. Ing. 1893, S. 566.

Rosset, Détermination de l'eau liquide ... dans la vapeur. Génie civil 21. 12. 1907, S. 123.

Rademacher, Begriff des trockenen Dampfes, Z. d. V. d. Ing. 1893, S. 80.

Denton, The reliability of throttling calorimeters. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 1896, S. 175.

Sendtner, Bestimmung der Dampffeuchtigkeit mit dem Drosselkalorimeter. Forschgsarb. Heft 98/99; Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 1421. Großes Kalorimeter, um die Entnahme von Proben zu umgehen und den ganzen Strom zu untersuchen. Daselbst weitere Literatur.

Fernhygrometer Bauart Schmitz, von Siemens & Halske. Mitteil. d. Werkes, August 1913.

Zu Kapitel XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.

Bujard, Bombe und Neuerungen daran. Dingler 5. 11. 1897.

Wolff, Kalorimetrische Untersuchungen, Z. d. V. d. Ing. 1897, S. 763; 1899, S. 331.

Flugblätter Nr. 1 und 6 des Magdeburger Vereins für Dampfkesselbetrieb; zu beziehen von diesem.

Bunte, Zur Wertbestimmung der Kohle, J. Gasbel., Wasservers. 1891, S. 41.

Langbein, Chemische und kalorimetrische Untersuchung von (festen) Brennstoffen, Z. f. angew. Chemie 1900, S. 1227. Derselbe, Über das ... Parr-Kalorimeter. Ebenda, 1903, S. 1075.

Gramberg, Zeichnerische Strahlungsberichtigung bei Heizwertbestimmungen mit der Bombe, Z. d. V. d. Ing. 1907, S. 262.

Allcut, Experiments on a bomb calorimeter. Engg. 1910, II, S. 755.

Hempelsches Kalorimeter, J. Gasbel., Wasservers. 12. 9. 1903; Zeitschrift für angew. Chemie 1901, S. 713; für teerhaltige Gase bei Wendt, Forschgsarb. Heft 31, S. 70.

E. Meyer, Festlegung des Begriffes Heizwert, Z. d. V. d. Ing. 1899, S. 282.

Pfeifer, Heizwertbestimmung v. Leuchtgas, J. Gasbel., Wasservers. 14. 9. 1901.

Stoecker und Rothenbach, Kalorimeter zur Bestimmung des Heizwertes kleiner Gasmengen, Journ. Gasbel., Wasservers. 15. 2. 1908, S. 121.

Immenkötter, Üb. d. Junkers-Kalorimeter, Eigenschaften und Fehlerquellen, Journ. Gasbel., Wasservers. 19. 8. 1905.

Pleyer, Üb. Heizwertbestimmung von Gasen (billiger Apparat von Gräfe), Journ. Gasbel., Wasservers. 7. 9. 1907.

Zu Kapitel XIV. Gasanalyse.

Bücher: Winkler, Technische Gasanalyse; Hempel, Gasanalytische Methoden; kleiner: Neumann, Gasanalyse und Gasvolumetrie; Franzen, Gasanalytische Übungen.

E. Meyer, Untersuchung der Abgase am Gasmotor, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 948.

Bunte, Selbsttätige Rauchgasanalyse, Z. d. V. d. Ing. 1903, S. 1087.

Dosch, Wert und Bestimmung des CO_2-Gehalt der Heizgase; Zusammenstellung der Apparate. Dingler 6. 12. 1902.

Baumgärtner, Ados-Apparat, Z. d. V. d. Ing. 1902, S. 320.

Wdowiszewskis verbesserter Orsat-Apparat, Stahl u. Eisen 15. 2. 1903.

Wencelius, Analyse der Hochofen- und Generatorgase, Stahl u. Eisen 15. 6. 1902.

Zahlreiche Notizen über Untersuchung der Verbrennungsgase von Steinkohlen, auch auf schwere Kohlenwasserstoffe u. a., in Constam und Schlaepfer, Forschungsarb. Heft 103.

Stribeck, Prüfung von Feuerungen, Rußmessung, Z. d. V. d. Ing. 1895, S. 184.

Fritzsche, Bestimmung der Rußmenge, Z. d. V. d. Ing. 1897, S. 885.

Borth, Üb. Rauchgasanalyse, Z. d. bayr. Rev.-Vereins 28. 2. 1907.

Hahn, Neue Orsat-Apparate, Z. d. V. d. Ing. 1906, S. 212.

Hahn, Neue Orsat-Apparate für die technische Gasanalyse. Z. d. V. d. Ing. 1911, S. 473.

Strache, Selbsttätige Gasanalyse an Wassergasanlagen, Z. d. V. d. Ing. 1908, S. 1041.

Küppers, Bestimmung des Methangehaltes der Wetterproben mit Hilfe des tragbaren Interferometers. Glückauf 1913, S. 47.

Namen- und Sachverzeichnis.

Abkühlungsversuch (Kühlanlage) 333.
Ableiten (Differenzieren) von Kurven 343.
Ableitung (Temperaturmessung) 321, 325, 329.
Ablesung 21, (schnelle) 11, 12, (schwankende Größen) 16, von Skalen- und integrierenden Instrumenten 271.
Abreißspitze 123, 139.
Abscheidekalorimeter 345.
Absoluter Druck, Überdruck, Vakuum 51.
Abweichende Werte (stark) 31.
Ados-Apparat 384.
Amsler 42, 224, 228.
Analysator, Harmonischer 232.
Analyse (Kohle) 358, (Kraftgas) 389, selbsttätige 383, optische 390, (Rauchgas) 367.
Anbau von Instrumenten 15, von Indikatoren 263, von Manometern 67, von Thermometern 328.
Anemometer 91, statische 95.
Anemoklinometer 395.
Anemotachometer 93.
Ankerschaltung 74.
Anklopfen beim Ablesen 22.
Aperiodische Dämpfung 12.
Aräometer 106.
Arbeit 200.
Arbeitseinheit 3.
Arbeitszähler 310.
Aschengehalt 358.
Aspirator 352.
Aspirationspsychrometer 337.
Atmosphäre, technische und physikalische 50, 51.
Auffüllmethode (Luftbehälter) 125.
Auftrieb beim Wägen 116.
Ausblasemethode (Luftbehälter) 127.
Ausdehnung der Flüssigkeiten 101.
Ausdehnung (Quecksilber) 56, (Sole) 102, (Wasser) 101.
Ausdehnungsthermometer 317.
Ausflußapparat von Schilling-Bunsen 108.
Ausflußöffnungen, Anordnung der 145.
Ausflußöffnung an Rohrleitung 146, für Wasser und Luft 140.
Ausfluß von Luft 151.
Ausflußzahlen nach Brandis 149.
Ausflußziffer 136, 142, 155.
Ausgleichinstrumente 18.
Ausgleichung von Fehlern 31.
Auslaufversuch 240, 245, doppelter 248.
Auswertung 23.

Baeyer 192.
Bandbremse 211.
Bandindikator 283.
Barometer, abgekürztes 57.
Barometerstand, Bestimmung, Reduktion auf Meeresspiegel 70, nach Zeitungen 70, normaler 51, 103.
Beharrungszustand 25.
Berg 294.
Beispiele in Zahlen:
- Abkühlungsversuch an einer Kühlanlage 333.
- Auslaufversuch 245, doppelter 248.
- Auswertung eines Diagrammpaares 269.
- Bestimmung des Vakuums 53.
- Betriebsverhältnisse eines Zentrifugalventilators 34.
- Bremsung eines Elektromotors 32.
- Dämpfung 300.
- Dampfverbrauch einer Dampfmaschine aus dem Diagramm 130.
- Dampfverbrauchsversuch 271.
- Diagrammauswertung einer Dreifachexpansionsmaschine 266.
- Diagramm-Maßstab 288.
- Eigenverluste einer Wirbelstrombremse 245.
- Einstrahlungsversuch bei Kühlern 335.
- Essenverluste 382.
- Gasverbrauch einer Gasmaschine 103.
- Gewicht von feuchter Luft 104.
- Heizwertbestimmung von Leuchtgas 361, von Steinkohle 355.
- Leistung eines Ventilators 105.
- Leuchtgasanalyse 389.

Luftfeuchtigkeit 339.
Luftlieferung und Lieferungsgrad eines Kompressors 127.
Luftmenge in einem Rohr aus Geschwindigkeitsverteilung 132.
Luftüberschuß 367.
Maßstabberechnung von Schaubildern 3.
Nacheilung des Markenschreibzeuges 284.
Rauchgasvolumen 380.
Reduktion von Gasvolumen 103.
Reduzierung des Vakuums 53.
Schwingende Masse bei Indikatoren 300.
Volumetrischer Wirkungsgrad eines Kompressors 129.
Wärmeinhalt von Dampf 342.
Wärmeleistung eines Luftkühlers 339.
Belastungswiderstände, elektrische 237.
Bendemann 143, 191, 194.
Beobachtungsfehler 31.
Bernstein 206.
Beschleunigungszustände 201, 245.
Bifluid-Tachometer 78.
Bollinckx 273.
Bombenkalorimeter 350.
Bopp & Reuther 171, 173.
Borth 296.
Böttcher 315.
Brabbée 98.
Brandis 150, 154.
Brauer 145, 212.
Brauersches Verfahren (Wassermessung) 146.
Braun 78.
Bremsdynamometer 208.
Bremsen, Selbstregelnde 212.
Bremse und Kraftmaschine 221.
Bremsleistung 251.
Bremsung (Dampfmaschine) 271, (elektrische) 236.
British Thermal Unit 333.
Brückenwage 116.
Bruttogewicht 121.
Büchner 68.
Bunsen 109.
Buntesche Bürette 374.

Carpenter 345.
Castel 137.
Celsiusskala 316.
c-g-s-System 4.
Charakteristik von Instrumenten 7, 20.
Chemische Messung von Gasmengen 114, 379, von Wassermengen 115, 396.
Coradi 42, 47.
Cramers Kohlensäuremesser 374.
Crosby-Geradführung 260.
Crossley-Trommel (Gasuhr) 177.

Dalton 104.
Dampf, Wärmeeinheit 342.
Dampffeuchtigkeit 343.
Dampfkessel, Verdampfung 342.
Dampfmaschine, Indizierte Leistung 271.
Dampfmesser 190.
Dampfmessung durch Kondensatmessung 128.
Dampfspannung 69.
Dampftemperatur 70.
Dämpfung (Instrumente) 11, (aperiodische) 12, (doppelte) 11.
Dampfverbrauchsversuch 271.
Dampfzeiger 195.
Darstellung von Ergebnissen 30.
Dauermessung 122.
Dauerversuche, Ablesung und Auswertung 270.
Dezimalwage 117.
Diagramm, versetztes (verschobenes) 279.
—, Zeit- und Kurbelweg 280.
Diagrammaßstab 288.
Diagrammauswertung (Indikator) 266.
Diagrammbündel (Gasmaschine) 268.
Dichte 101.
Differentialmanometer 64.
Differenzieren von Kurven 243.
Differenzmethode 29.
Dimension 2.
Direktionskraft 5.
Drehmoment 201.
Dreyer, Rosenkranz & Droop 66, 169, 252, 255, 256, 259, 280.
Drosselkalorimeter 343.
Druck, absoluter, Überdruck, Unterdruck 51.
—, dynamischer 68.
—, gesamter 68.
—, spezifischer 49.
—, statischer 68, 97.
Druckentnahme 149.
Druckhöhe, Messung der 144, (Pumpe) 67.
Druckverlust (Wassermesser) 166.
Durchflußöffnung an Rohrleitungen 152.
Düse 143.
—, für Dampfmesser 195.
Dynamisches Verhalten der Instrumente 8.
Dynamometer, Brems- 204.
—, Föttinger 231.
— für Kraftmessungen 204, für Dampfpflüge 206.
— Transmissions- 222.
Dynamometrische Meßmethoden 223.

Eberle 278.
Eckardt 65, 167, 180, 195.

Effektive Leistung 251.
Eichung 7, 20, Anemometer 93, Ausflußöffnung 143, Gasmesser 179, Indikatorfeder 273, Manometer 65, Mikromanometer 62, Thermometer 328, Wage 120.
Eigenschaften der Instrumente 4.
Eigenschwingungszahl von Instrumenten 10.
Eigenverluste, Bremsscheibe 245, Elektromotor 32, Turbodynamo 248.
Einheiten, einfache und zusammengesetzte 1, praktische 3, Arbeit 202, Geschwindigkeit 72, Kraft 202, Leistung 202, Spannung 50, Stoffmenge 100, Temperatur 316, Wärmemenge 331.
Einstrahlmesser 170.
Einstrahlungsversuche (Kühlanlage) 335.
Einströmung in eine Leitung (Luft, Wasser) 159.
Elastische Nachwirkungen 8.
Elektrische Belastungswiderstände 237.
— Leistungsmessungen 236.
— Temperaturmessungen 321.
Elektromotor 32.
Elster 178.
Empfindlichkeit, Wassermesser 166.
Energieumsatz in Instrumenten 5.
Englisches Maßsystem 51, 203, 333.
Entnahme des Druckes, Ausflußöffnung 149, Dampfmesser 194.
Ernecke 243.
Ertel 88.
Essenverluste 379.

Fadenkorrektion (Thermometer) 319.
Fanghaken (Indikator) 262.
Federdynamometer 227.
Federmanometer 53.
Federmaßstab (Indikator) 273.
Federschwingungen (Indikator) 289.
Fehler, Ablesung 21, Auswertung 23, mittlerer 30, parallaktischer 21, Schreibstiftbewegung (Indikator) 289, Trommelbewegung (Indikator) 294, zufällige und systematische 31.
Fehlermaßstab 30.
Fehlerkurve, Wassermesser 166.
Fernmeldung 6.
Ferntachometer 79.
Feuchtigkeitsgehalt 336, von Gasen 104.
Fischinger - Dynamometer 226.
Flächenmessung 41.
Fliehpendeltachometer 76.
Flügelgleichung 89.
Flügelkonstante 90.
Flügelradmesser für Druckluft 173, für Wasser 168.
Flüssige Brennstoffe 363.
Flüssigkeit, Ausdehnung 102, spezifisches Gewicht 106.
Flüssigkeitsbremse 217.
Flüssigkeitsmanometer 56.
Flüssigkeitssäule 50.
Flüssigkeitstachometer 78.
Flüssigkeitswärme 341.
Fortschreitende Geschwindigkeit einer Luftmenge 91.
Förderhöhe einer Pumpe 67.
Föttinger - Dynamometer 230.
Frahm- 87.
Francis- 137, 139, 140.
Freilaufeichung 94.
Frese 137, 139.
Froude - Wasserbremse 217.
Fteley - Stearns 137.
Fuess 70, 91, 98, 337.
Fuchstemperatur 329.

Garvenswerk 119.
Gasanalyse 365.
Gase, Heizwert 359, Menge 153, 175, 379, spezifisches Gewicht 108, Zusammensetzung 365.
Gasmaschine, Indizieren 269, 279.
Gasmesser 175, (Thomas-) 188, Eichung 179.
Gassäulenwage 110.
Gaswage 109.
Gay - Lussac 103.
Gebläse, Lieferungsgrad 127, Indizieren 260.
Gefäße für Flüssigkeitsmessung 121.
Gehre 197.
Genauigkeit (Ablesung) 27, (Korrektion) 28, (Zahlenangaben) 26.
Germania - Werft 219.
Gesamtdruck 68.
Geschwindigkeit 72, nicht gleichförmige 82.
Geschwindigkeitsmesser für Wasser 168.
Geschwindigkeitsverteilung in einem Rohre 133.
Gewicht 100, spezifisches 106.
— oder Volumen angeben 104.
Gradführung (Indikator) 260.
Graphische Darstellung von Versuchsergebnissen 30.
Graphitpyrometer 326.
Grundeinheiten 2, technische und physikalische 4.
Güldner 85.
Gümbel 311.

Haarhygrometer 336.
Haber 113.
Hahn 388.
Hakenmesser 139.
Handtachometer 81.

Handzählwerk 81.
Hansen 137, 139.
Harfenplanimeter 49.
Harmonischer Analysator 232.
Hartmann & Braun 79, 80.
Hebelhubminderer 254.
Heinz 370.
Heizwert, oberer und unterer 346, feste Brennstoffe 350, flüssige 363, gasförmige 359.
Hempel 371.
Hempelsche Apparate 374.
Hohlborn & Henning 382.
Homogenität von Formeln 2.
Horn 83.
Hubminderer (Indikator) 253.
Hydrometrischer Flügel 88.
Hygrometer 336.
Hysteresisbremse 220.

Indikator 250.
— Band- 283.
— Bauarten 251.
—, besondere Anwendungen 304.
—, Diagramm 250.
—, Diagrammpapier 262.
—, für hohe Umlaufzahl 263, 305.
—, Federmaßstab 273.
—, Federeichung 273.
—, Federschwingungen 289.
—, Handhabung 263.
— als Kraftmesser 303.
— Mikro- 309.
—, optischer 306.
— -Schreibstift 262.
— -Trommel 261, mit Anhalteeinrichtung 262.
— -Trommelbewegung 294.
— umlaufende Trommel 281.
— -Trommel für fortlaufende Diagramaufnahmen 305.
— für Zeitdiagramme 280.
Indizierte Leistung 251.
Instrumente, allgemeine Eigenschaften 7, Skalen-, Ausgleich-, totalisierende, integrierende 18.
Integraph 48.
Integrierung, mechanische, bei Meßinstrumenten 185, 188, 197.
Interferometer 390.
Iterson 116.

Jenaer Glas 316.
Junkers 179.
Junkers - Kalorimeter 359.

Kalorie 331.
Kalorimeter 350, Drossel- 344, Abscheide- 345, Bomben- 350, Parr- 357.
Kaltfederindikator 251.
Kaltwarmes Rohr 390.
Kapselmesser 172.
Kesselspeisewassermesser 167.
Kilowatt 202.
Kingscher Überlauf (Gasuhr) 178.
Kippwassermesser 180.
Kirsch 43.
Kittler 223.
Klönne 87.
Kohle, Zusammensetzung 358.
Kohlensäuremesser 374.
Kolbenfläche, wirksame (Indizieren) 266.
Kolbenmanometer, Kolbenpresse 66.
Kolbenwassermesser 167.
Kolbenwegdiagramme 250.
Kompressor, Kälte- (Indizieren) 305.
Kondensatmessung (Wärmemessung) 343.
Konstruktionsregeln für Instrumente 14.
Kontraktionszahlen 143, 147.
Kontrollmanometer 67.
Korrektion 7, 20, 28.
Kraftmesser 303.
Kraftmessung 199.
Krell 110.
Krökersche Bombe 351.
Kubizierapparat 179.
Kühlmaschine, Indizieren 305.
Kurbelmitnehmer (Indikator) 263.
Kurbelwegdiagramme (Indikator) 286.
Kurven nach Beobachtungspunkten 31.
Kurvenscharen 33.

Langbein 352.
Länge, Nenn- und Soll- 38.
Längenmessung 37.
Laufgewichtswage 118.
Le Chatelier - Pyrometer 322.
Lehmann & Michels 257, 311.
Leistung 200, indizierte und effektive 251, elektrische 236.
Leistungsbestimmung mit Indikator 266, bei Dauerversuchen 270, aus dem Rückdruck 233.
Leistungszähler 313.
Lesbros 137.
Levy 235.
Linearplanimeter 46.
Lorenz 54.
Luftfeuchtigkeit 335.
Luftmenge bei Gasmaschinen 114, in Kanälen und Rohren 131.
Luftüberschußziffer 366.
Luftwechsel eines Raumes 115.
Lunge 107.
Lux 58, 109.

Mader 87, 232, 309.
Maihak 252, 263, 315.
Manometer 51, Anbau 67, Eichung 65, mit zwei Flüssigkeiten 59.
M. A. N. 205.
Mariotte 103.
Masseneinheit 4.
Massenschwingungen (Indikator) 296.
Maßsystem, technisches 2.
Maßstab, End- und Strich- 40.
— von Indikatorfedern 273, von Schaubildern 3.
Meinecke 169, 170, 171.
Mengenvermittlung aus dem Indikatordiagramm 129, aus der mittleren Geschwindigkeit 130.
Mengenmessung, Zähler für dauernde 163.
Meßdose 204.
Meßgefäß mit Ausflußöffnungen 145.
Meßglocke 124.
Meßmaschine 41.
Meßmethoden, dynamometrische 223.
Metallthermometer 326.
Mikroindikator 309.
Mikromanometer 60.
Mischungsregel 114.
Mittelwert 23, und Momentanwert (Ablesung) 272, logarithmischer 25, kubischer 25, quadratischer 24, der Produkte 25, bei reziproken Werten 25, wahrscheinlichster 32, Wurzel- 25.
Mitwind bei Anemometereichung 94.
Mollier 345.
Morell 93.
Motorzähler 164.
Müller, A. O. 143, 147.
Multiplikationsgetriebe (Dampfmesser) 198.
Mündung 143, scharfkantige in glatter Rohrleitung 154.
Mündungsdampfmesser 194.

Nachwirkungen, elastische 8.
Naßläufer 170.
Nettogewicht 121.
Nonius 39.
Normaldüse (Luftmessung) 157.
Normaler Gaszustand 103.
Nullpunkt, unterdrückter 17.
Nullpunktskontrolle 18, 67.

Offene Wassermesser 180.
Öffnungsverhältnis 147.
Optischer Indikator 306.
Optisches Pyrometer 327.
Optische Gasanalyse 390.
Orsat-Apparat 367, erweiterter 388.
Ott 89.

Parallaktischer Fehler 21.
Parr-Kalorimeter 357.
Partialwassermesser 162.
Pendeldynamo 235, Pendelmotor 236.
Pendelversuch zur Bestimmung von Trägheitsmomenten 242.
Pettenkofer 115.
Pferdekraftstunde 203.
Pferdestärke 202.
Pintsch 188.
Pitotrohr 97.
Planimeter 41.
Polarplanimeter 42.
Polikeit 206.
Poncelet 137.
Prandtl 97.
Pronyscher Zaum 208.
Prozentangabe bei Vakuummetern 53.
Prozentrechnungen 23.
Psychrometer 336.
Pumpen, Indizieren von 270, 292, 294.
Pyrometer 322.

Quadratischer Mittelwert 24.
Quecksilber, Ausdehnung 56.
Quecksilberdruckthermometer 326.
Quecksilbermanometer 56.
Quecksilbersäule 50.
Quecksilberthermometer 317.

Rankinisieren 288.
Rauchgasanalyse 367.
Rauchgasanalysator 110, 386.
Rauchgasmenge 379.
Rauchgastemperatur 329.
Raummaß 100.
Recknagel 61, 99.
Reduktion (spezifisches Gewicht) 103, (Volumen) 102.
Registrierung 6.
Reibung an Instrumenten 10.
Reinecker 41.
Relativgewicht 101.
Rhenania 193.
Richtkraft von Instrumenten 5.
Riemendynamometer 225.
Rollenhubminderer 254.
Rollplanimeter 48.
Rosenmüller 92, 97, 172.
Rückdruck, Leistungsbestimmung aus dem 233.
Rundlaufapparat für Anemometereichung 94.
Runge 87.

Schädlicher Raum, Vergrößerung durch den Indikator 294.
Schaeffer & Budenberg 54, 55, 57, 76, 77, 204, 344.

Schaubild aus Beobachtungspunkten 31, 34, der Eichergebnisse 20, Maßstab 3.
Scheibenplanimeter 47.
Scheibenwassermesser 173.
Schenck 185, 187.
Schilling-Bunsen 108.
Schillingscher Ausflußapparat 000.
Schirmmessung (Wasser) 134.
Schleppversuche (Flügel) 90.
Schmidscher Kolbenwassermesser 168.
Schraubenmikrometer 40.
Schraublehre 40.
Schreibstiftbewegung, Fehler der 289.
Schröter-Koob 279.
Schublehre 39.
Schwimmerdampfmesser 191.
Schwingungen, gedämpfte 11, Indikatorfeder 289, im Diagramm 293.
Segersche Kegel 327.
Seignol 307.
Seilbremse 215.
Selbstregelung von Bremsen 215.
Siebert & Kühn 368.
Gebr. Siemens & Co. 184.
Siemens & Halske 161, 169, 171, 174, 213, 395.
Simpsonsche Regel 48.
Skala, gleichmäßig, verjüngt, erweitert, mit unterdrücktem Nullpunkt 17.
Skaleninstrumente 18.
Skalenkorrektion 320.
Spannung 49.
Spannungsentnahme 68.
Sperrkegelschaltung 74.
Spezifischer Dampfverbrauch 272.
Spezifisches Gewicht 100, (Flüssigkeiten) 106, (Quecksilber) 56, (Wasser) 101.
Spezifische Wärme 330, (Wasser) 331, (Wasserdampf) 342, (Rauchgas) 382.
Spiegelderivator 243.
Spiegellineal 244.
Stach 94.
Stangenplanimeter 48.
Statisches Verhalten der Instrumente 6.
Staudruck 96.
Stauffer, Son & Co. 71.
Stauflansch 153, 156.
Staugerät 95.
Staurohr 97.
Stauscheibe 99.
Stechuhr 71.
Steinmüller 182.
Stellenzahl bei Ablesungen und Rechnungen 27.
Stoffmenge 100.
Stoppuhr 71.
Strahlungsberichtigung 354.
Strahlungseinfluß (Pyrometer) 325, (kalorimetrische Versuche) 333, (Temperaturmessung) 320, 325.
Strahlungspyrometer 327.
Strichmaße 40.
Strömungsmesser 165, 187.
Stufenkolbenpumpe (Indizierte Leistung) 270.

Tachograph 83.
Tachometer 76, Antrieb 80, Meßbereich 80.
Tachometerwerke, Deutsche 77, Rheinische 78.
Tara 121.
Technisches Maßsystem 2.
Temperatur 316 (Celsius und absolute) 316, (und Dampfspannung) 89, (Flüssigkeitsmanometer) 56, (Flüssigkeitsmessung) 101, 121 (Indikator) 273, (Längenmessung) 37.
Temperaturmessung mit Manometern 53.
Thalpotasimeter 326.
Thermo-elektrische Meßmethoden 322.
Thermokräfte 324.
Thermometer 317, (Anbringung) 329, (Trägheit) 320.
Thomasmesser (Gas) 188.
Thompson-Gradführung 260.
Torsionsdynamometer 228.
Totalisierende Instrumente 18.
Totpunkteinstellung (Indikator) 263.
Tourenzähler 81.
Trägheit (Instrumente) 9, (Thermometer) 320.
Trägheitsmoment 240.
Transmissionsdynamometer 222.
Trockenläufer 170.
Trommel, umlaufende (Indikator) 281.

Überfallmessung 137.
Überhitzungswärme 341.
Uhr 71.
Umfangsgeschwindigkeit 72, 73.
Umlaufzähler 74.
Undograph 87.
Unempfindlichkeit = Ungenauigkeit von Instrumenten 7.

Vakuumangabe 52.
Vakuummeter 51, 57, Skala 53.
Ventilator 34, 105.
Ventilerhebungsdiagramm 294.
Venturirohr 160.
Verbandsformel (Heizwert) 364.
Verbrennungswasser 353.
Verdampfungswärme 341.
Verhalten der Instrumente, dynamisches 8, statisches 6, ungedämpft 9.
Versetztes (verschobenes) Diagramm 279.
Vieweg-Wetthauer 229.

Volumen, reduziertes von Gasen 102, oder Gewicht angeben 104.
Volumetrischer Wirkungsgrad 129.

Wage 116, Entlastung 118, selbsttätige 185.
Wägen 116, Flüssigkeiten 121, kontinuierlich, automatisch 185.
Wagener 48, 243, 280, 283.
Wanner-Pyrometer 327.
Wärme, spezifische 330-
Wärmeäquivalent, mechanisches 203, elektrisches 203.
Wärmeaustausch 333.
Wärmeeinheit 331.
Wärmemenge, Wärmeinhalt 330, Dampf 341, Rauchgas 382.
Warmfederindikator 251.
Wasser, Ausdehnung 101, spezifische Wärme 331.
Wasserbestimmung in Brennstoffen 358.
Wasserbremse 217.
Wasserdampf, Feuchtigkeit 343, in Rauchgasen 375, Wärmeinhalt 341.
Wassermanometer 58.
Wassermenge in Flußläufen und Kanälen 131.
Wassermesser 161, 166, offene 180, -Verbindungen 170.
Wassermessung mit Schirm 134, mit Wehr 135, mit Mündungen 143.
Wassersäule 50.
Wasserstoffbestimmung 387.
Wasserstoffskala (Temperatur) 317.
Wasserwert 334.
Wasserwiderstand 239.
Wehrmessung 135.
Weingeistthermometer 318.
Weisbach 143, 147.
Widerstände, Belastungs- 239.
Widerstandsthermometer 321.
Wiegedynamometer 226.
Winkelgeschwindigkeit 72.
Wirbelbewegung in Luftströmung 100.
Wirbelstrombremse 219.
Wirbelstromtachometer 77.
Wirkungsgrad, mechanischer 272, volumetrischer 129.
Wolpert 115.
Woltmannscher Flügel 88.
Woltmann-Wassermesser 171.
Worthington-Messer 167.

Zahlenangaben, Genauigkeit 26.
Zählwerk 74.
Zahndruckdynamometer 223.
Zaum, Pronyscher 208.
Zehnerschaltung 75.
Zeißwerke 390.
Zeit 71.
Zeitdiagramm (Indikator) 280.
Zeitmessung 71.
Zentesimalwage 117.
Zugdynamometer 204.
Zugmesser 58.
Zusammensetzung (Kohle) 358, (Kraftgas) 387, (Leuchtgas) 389, (Rauchgas) 365.
Zwanglaufeichung (Anemometer) 94.
Zylinderkonstante 271.

Druck der Spamerschen Buchdruckerei in Leipzig.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Die Werkzeuge und Arbeitsverfahren der Pressen. Völlige Neubearbeitung des Buches „Punches, dies and tools for manufacturing in presses" von Joseph V. Woodworth von Privatdozent Dr. techn. **Max Kurrein,** Betriebsingenieur des Versuchsfeldes für Werkzeugmaschinen an der Kgl. Technischen Hochschule zu Berlin. Mit 683 Textfiguren und einer Tafel.
In Leinwand gebunden Preis M. 20.—.

Taschenbuch für den Maschinenbau. Bearbeitet von hervorragenden Fachleuten und herausgegeben von Ing. **H. Dubbel,** Berlin. 1493 Seiten mit 2448 Texfiguren und 4 Tafeln. Zwei Teile. In englisch Leinen gebunden.
In einem Bande Preis M. 16.—; in zwei Bänden Preis M. 17.—.

Thermodynamische Grundlagen der Kolben- und Turbokompressoren. Graphische Darstellungen für die Berechnung und Untersuchung. Von **Adolf Hinz,** Oberingenieur der Frankfurter Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vormals Pokorny & Wittekind in Frankfurt a. M. Mit 12 Zahlentafeln, 54 Figuren und 38 graphischen Berechnungstafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 12.—.

Hilfsbuch für den Maschinenbau. Für Maschinentechniker sowie für den Unterricht an technischen Lehranstalten. Von Prof. **Fr. Freytag,** Lehrer an den Techn. Staatslehranstalten zu Chemnitz. Vierte, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 1108 Textfiguren, 10 Tafeln und einer Beilage für Österreich.
In Leinwand gebunden Preis M. 10.—; in Leder gebunden M. 12.—.

Berechnung, Entwurf und Betrieb rationeller Kesselanlagen. Von **Max Gensch,** Ingenieur. Mit 95 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 6.—.

Die Dampfkessel nebst ihren Zubehörteilen und Hilfseinrichtungen. Ein Hand- und Lehrbuch zum praktischen Gebrauch für Ingenieure, Kesselbesitzer und Studierende von **R. Spalckhaver,** Regierungsbaumeister, Kgl. Oberlehrer in Altona a. E., und **Fr. Schneiders,** Ingenieur in M.-Gladbach (Rhld.). Mit 679 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 24.—.

Technische Thermodynamik. Von Prof. Dipl.-Ing. **W. Schüle.** (Zweite, erweiterte Auflage der „Technischen Wärmemechanik".)

Erster Band: Die für den Maschinenbau wichtigsten Lehren nebst technischen Anwendungen. Mit 223 Textfiguren und 7 Tafeln.
In Leinwand gebunden Preis M. 12.80.

Zweiter Band: Höhere Thermodynamik, mit Einschluß der chemischen Zustandsänderungen, nebst ausgewählten Abschnitten aus dem Gesamtgebiet der technischen Anwendungen. Mit 155 Textfiguren und 3 Tafeln.
In Leinwand gebunden Preis M. 10.—.

Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgas-Anlagen. Von **Hugo Güldner,** Maschinenbaudirektor, Vorstand der Güldner-Motoren-Gesellschaft in Aschaffenburg. Dritte, neubearbeitete und bedeutend erweiterte Auflage. Mit 1282 Textfiguren, 35 Konstruktionstafeln und 200 Zahlentafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 32.—.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Handbuch der Feuerungstechnik und des Dampfkesselbetriebes mit einem Anhange über allgemeine Wärmetechnik. Von Dr.-Ing. **Georg Herberg,** Stuttgart. Mit 54 Textabbildungen und Diagrammen, 87 Tabellen, sowie 43 Rechnungsbeispielen. In Leinwand gebunden Preis M. 7.—.

Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle, insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes. Zugleich ein Leitfaden für die Arbeiten in den Maschinenlaboratorien technischer Lehranstalten. Von Professor **Julius Brand,** Oberlehrer der Kgl. Vereinigten Maschinenbauschulen zu Elberfeld. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 285 Textfiguren, 1 lithographischen Tafel und zahlreichen Tabellen. In Leinwand gebunden Preis M. 8.—.

Ed. Autenrieth, Technische Mechanik. Ein Lehrbuch der Statik und Dynamik für Maschinen- und Bauingenieure. Zweite Auflage. Neu bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. **Max Ensslin** in Stuttgart. Mit 297 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 18.—.

Probenahme und Analyse von Eisen und Stahl. Hand- und Hilfsbuch für Eisenhütten-Laboratorien. Von Prof. Dipl.-Ing. **O. Bauer,** Privatdozent, ständiger Mitarbeiter in der Abteilung für Metallographie am Kgl. Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde W., und Dipl.-Ing. **E. Deiß,** ständiger Mitarbeiter in der Abteilung für allgemeine Chemie am Kgl. Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde W. Mit 128 Textabbildungen. In Leinwand gebunden Preis M. 9.—.

Chemische Untersuchungsmethoden für Eisenhütten und deren Nebenbetriebe. Eine Sammlung praktisch erprobter Arbeitsverfahren. Von Ing.-Chem. **Albert Vita,** Chefchemiker der Oberschlesischen Eisenbahnbedarf-A.-G. Friedenshütte, und Dr. phil. **Carl Massenez,** Assistent an der Kgl. Technischen Hochschule in Breslau. Mit 26 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 4.—.

Die Praxis des Eisenhüttenchemikers. Anleitung zur chemischen Untersuchung des Eisens und der Eisenerze. Von Dr. **Carl Krug,** Dozent an der Kgl. Bergakademie zu Berlin. Mit 31 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 6.—.

Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau. Von Dr.-Ing. **A. Martens,** Geh. Oberregierungsrat, Professor und Direktor des Kgl. Materialprüfungsamtes Groß-Lichterfelde W.

Erster Band: Materialprüfungswesen. Probiermaschinen und Meßinstrumente. Mit 514 Textfiguren und 20 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 40.—.

Zweiter Band: Die technisch wichtigen Eigenschaften der Metalle und Legierungen. Von **E. Heyn,** Etatsmäßiger Professor für mechanische Technologie, Eisenhütten- und Materialienkunde an der Kgl. Technischen Hochschule Berlin und Direktor im Kgl. Materialprüfungsamt Groß-Lichterfelde W. Hälfte A. Die wissenschaftlichen Grundlagen für das Studium der Metalle und Legierungen. Metallographie. Mit 489 Textfiguren und 19 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 42.—.

Die praktische Nutzanwendung der Prüfung des Eisens durch Ätzverfahren und mit Hilfe des Mikroskopes. Kurze Anleitung für Ingenieure, insbesondere Betriebsbeamte. Von Dr.-Ing. **E. Preuß,** Stellvertreter des Vorstandes der Materialprüfungsanstalt und Privatdozent an der Technischen Hochschule zu Darmstadt. Mit 119 Textfiguren. Kartoniert Preis M. 3.60.